

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Obor: Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Optimalizace popouštění nitrocementované oceli 16MnCr5

Optimisation of tempering for nitro carburizing steel 16MnCr5

KMT-209

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Daďourek CSc.

Konzultant: Ing. Karel Vlasák - Narex, a.s. Česká Lípa

Rozsah práce:	počet stran	50
	počet obrázků	26
	počet grafů	7
	počet tabulek	2
	počet příloh	8

Liberec, květen 2005



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní rok: 2004/05

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Adam P A Z O U R E K

studijní program

M 2301 Strojní inženýrství

obor

2303 T 002 Strojírenská technologie

zaměření

Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Optimalizace popouštění nitrocementované oceli 16MnCr5

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle magisterské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s chemickotepelným zpracováním ocelí ve firmě Narex Česká Lípa.
2. Navrhněte a proveďte vhodný experiment k určení vrubové houževnatosti uvedené oceli v závislosti na teplotě popouštění (především stanovení intervalu popouštěcí křehkosti)
3. Provedený experiment vyhodnoťte a vyvoďte závěry pro optimalizaci chemickotepelného zpracování k získání požadovaných vlastností (tvrdost, hloubka vrstvy).

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 30 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] RYŠ,P. a kol.: Nauka o materiálu I/4, Academia Praha 1968
- [2] LACHTIN,J.M., ARZAMASOV,B.N.: Chimiko-termičeskaja obrabotka metallov, Metallurgija, Moskva ,1985

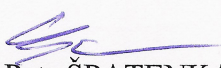
Vedoucí diplomové práce:

doc.Ing.Karel Daďourek,CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing.Karel Vlasák – Narex Česká Lípa




prof. RNDr.Petr ŠPATENKA,CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31.10. 2004

Platnost zadání magisterské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání magisterské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

ANOTACE

Jméno:	Adam Pazourek
Obor:	Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství
Zadání práce:	Optimalizace popouštění nitrocementované oceli 16MnCr5
Číslo práce:	KMT-209
Vedoucí práce:	doc. Ing. Karel Dad'ourek CSc.
Konzultant:	Ing. Karel Vlasák - Narex, a.s. Česká Lípa

Tato práce byla zadána firmou NAREX, a.s. Česká Lípa. Cílem bylo zjistit oblast popouštěcí křehkosti u materiálu 16MnCr5. Dalším řešeným problémem bylo stanovit vhodný interval popouštěcích teplot z ohledem na požadované výsledné vlastnosti po tepelném zpracování.

TECHNICAL UNIVERSITY LIBEREC

Mechanical Engineering Faculty

Material Science Department

ANNOTATION

Name:	Adam Pazourek
Specialization:	Materials and technology
Focus:	Material Engineering
Work topic:	Optimisation of tempering for nitro carburizing steel 16MnCr5
Work number:	KMT-209
Work leader:	doc. Ing. Karel Dad'ourek CSc.
Work consultant:	Ing. Karel Vlasák - Narex, a.s. Česká Lípa

This job was assigned by company Narex, a.s. Ceska Lipa. The primary target has been a determination of tempering brittleness range for material 16MnCr5. Next solved problem has been a suitable range determination of tempering temperatures in accordance to required final properties after thermic processing.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména paragraf 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Rád bych poděkoval doc. Ing. Karlu Daďourkovi CSc. za pomoc a věcné připomínky k obsahu práce, Ing. Karlu Vlasákovi za pomoc a podporu při práci na experimentální části práce, firmě Narex, a.s. Česká Lípa za poskytnutí možnosti zpracovat daný problém a za materiální a technickou podporu při řešení, Střední průmyslové škole v České Lípě za možnost využít její laboratoře při měření, katedře materiálu TU v Liberci za poskytnutí potřebné literatury a pomoc při konečném zpracování práce, Ireně Pazourkové za konečnou jazykovou úpravu. Všem děkuji.

OBSAH:

1. Úvod	1
2. Teoretická část	2
2.1 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ	2
2.1.1 Cementace	3
2.1.1.1 Vliv teploty a doby setrvání na teplotě na průběh nauhličování	3
2.1.2 Nitridace	4
2.1.2.1 Vliv teploty na průběh nitridace	4
2.1.3 Srovnání nitridace a cementace	5
2.1.4 Nitrocementace	5
2.1.4.1 Podstata	6
2.1.4.2 Vlastnosti zakalených nitrocementovaných vrstev	6
2.1.4.3 Odolnost nitrocementovaných vrstev proti opotřebení	8
2.1.4.4 Vliv zbytkového austenitu na strukturu vrstvy	8
2.1.4.5 Výhody nitrocementace	8
2.1.4.6 Nevýhody nitrocementace	9
2.2 POPOUŠTĚCÍ KŘEHKOST	10
2.2.1 Vysokoteplotní popouštěcí křehkost	10
2.2.1.1 Vliv popouštěcí křehkosti na mikrostrukturu	11
2.2.1.2 Vliv popouštěcí křehkosti na vrubovou houževnatost	11
2.2.2 Nízkoteplotní popouštěcí křehkost	12
2.3 ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	13
2.3.1 Rázová zkouška v ohybu	13
2.3.1.1 Provedení Charpyho zkoušky	14
2.4 MĚŘENÍ TVRDOSTI	16
2.4.1 Vickersova metoda	16
2.4.1.1 Volba zatěžující síly	17
2.4.1.2 Přesnost metody	17
2.4.1.3 Korekce při deformovaném vtisku	17
2.4.1.4 Použití metody pro určování mikrotvrdosti	17

2.5 HODNOCENÍ PODÍLU KŘEHKÉ MORFOLOGIE LOMOVÉ PLOCHY	18
2.5.1 Kavaleriho metoda	18
2.5.1.1 Stanovení největšího přípustného rastru	18
2.5.2 Metoda “kříže“	19
2.5.3 Přesnost užitých metod	19
2.5.4 Shrnutí k oběma metodám	20
3. Experimentální část	21
3.1 MATERIÁL	21
3.1.1 Základní rozbor materiálu 16MnCr5	21
3.1.1.1 IRA diagram	21
3.1.2 Příprava pro metalografickou analýzu	22
3.1.2.1 Velikost zrna	22
3.1.2.2 Struktura materiálu v dodaném stavu	24
3.1.2.3 Struktura materiálu po tepelném zpracování	25
3.2 VÝROBA VZORKŮ	29
3.3 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ	31
3.3.1 Pecní zařízení	31
3.3.2 Popis procesu NC0,3-0,5+PO	32
3.4 VÝSLEDKY ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	34
3.5 ZKOUŠKA TVRDOSTI	36
3.6 VÝSLEDKY KAVALERIHO METODY A METODY “KŘÍŽE“	39
3.7 SHRnutí VÝSLEDKŮ	46
4. Závěr	48
5. Použitá literatura	49
Seznam příloh	50

1. Úvod

Diplomová práce byla zadána firmou Narex, a.s. Česká Lípa. Společnost Narex, a.s. má dlouholetou tradici ve výrobě elektronářadí nejen v České Lípě.

Cílem diplomové práce bylo stanovit co nejpřesněji rozmezí teplot popouštěcí křehkosti u materiálu 16MnCr5 pomocí zvolené zkoušky. Dalším úkolem bylo určit optimální interval popouštěcích teplot vzhledem k daným požadavkům, které má součástka po tepelném zpracování splňovat. Hlavními požadavky jsou hloubka vrstvy a tvrdost povrchu.

2. Teoretická část

2.1 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ

Podstatou chemicko-tepelného zpracování je měnit při zvýšených teplotách chemické složení povrchových vrstev, a to difúzí, ke které dochází v prostředí obklopujícím zpracovávanou ocel. Prostředí s obohacujícím prvkem může být tuhé, kapalné nebo plynné.

Změnou chemického složení povrchu se výrazně mění mechanické a fyzikálně chemické vlastnosti povrchu oceli, přičemž jádro součásti zůstává po chemické stránce nezměněno. Vzniklá vrstva může mít vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení, zadírání nebo únavě. Aby bylo dosaženo tohoto efektu, je často nutné, aby byla ocel po proběhnutí difúzního pochodu ještě kalena a popouštěna.

Význam chemicko-tepelného zpracování je velmi důležitý, protože umožňuje nahrazení drahých slitinových ocelí s vysokým obsahem přísad ocelmi nízkolegovanými, nebo středně legovanými.

Různé způsoby chemicko-tepelného zpracování rozdělujeme obvykle podle prvků, kterými obohacujeme povrchovou vrstvu. Nejčastěji se používá cementace (sycení povrchu uhlíkem), nitridace (sycení povrchu dusíkem) a nitrocementace (současné sycení povrchu uhlíkem a dusíkem).

Každé chemicko-tepelné zpracování se skládá z řady pochodů, které na sebe navazují, nebo se podmiňují. Základními pochody jsou disociace, adsorpce a difúze.

Disociace je provázena rozpadem molekul sloučenin obalové látky, čímž vzniknou aktivní atomy, které jsou adsorbovány povrchem.

Adsorpce je fyzikální povahy, kde se uplatňují van der Waalsovy síly mezi molekulami plynu a povrchem, nebo je chemické povahy, kde působí mezi disociovanými atomy a povrchem meziatomové síly.

Difúze je pohyb atomů ve směru koncentračního spádu. Probíhá za předpokladu dostatečné koncentrace difundujícího prvku na povrchu základního kovu a za předpokladu dostatečné teploty ke zvýšení tepelného pohybu atomů. /1/

2.1.1 Cementace

Cementace je prvním krokem k povrchovému tvrzení houževnatých ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Jde o sycení povrchu oceli uhlíkem, který (v našem případě) vniká do oceli prostřednictvím plynné sloučeniny, např. CO. Cementace probíhá tak dlouho, dokud obsah uhlíku v povrchové vrstvě nedosáhne eutektoidní, nebo v některých případech i nadeutektoidní koncentrace. Doba potřebná k dosažení požadované koncentrace je výrazně závislá na teplotě.

Po skončení cementace je ocel kalena a popouštěna, což vede k získání požadovaných vlastností.

Pro cementaci volíme buď oceli uhlíkové s obsahem uhlíku do 0,2 %, nebo oceli slitinové, které zůstávají i po zakalení houževnaté. /2/

2.1.1.1 Vliv teploty a doby setrvání na teplotě na průběh nauhličování

Rychlost nauhličování je závislá na teplotě. Difúze směrem k jádru součásti je patrná již při teplotách 500 až 600 °C. V důsledku malé rozpustnosti uhlíku ve feritu se ferit rychle nasytí uhlíkem a na povrchu oceli se tvoří slabá vrstvička cementitu.

Při zvýšení teploty v rozsahu A_{C1} až A_{C3} (727 až 911 °C) se rychlost nauhličování zvyšuje. Rychlost difúze je závislá na difúzním koeficientu dané fáze. Difúzní koeficient feritu je vyšší než u austenitu při stejné teplotě. Pokud je v povrchové vrstvě cementované oceli přítomen ferit, sytí se rychle uhlíkem a v těchto místech vzniká austenit.

Pokud je teplota vyšší než A_{C3} , kdy je ocel v austenitickém stavu, rozpouští se uhlík přímo v austenitu, aniž by vznikal cementit až do chvíle nasycení austenitu uhlíkem, potom i zde začne vznikat cementit.

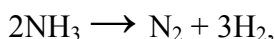
Se vzrůstající teplotou sice roste difúzní rychlost uhlíku do oceli, ale struktura oceli hrubne. Proto se cementační teplota pohybuje okolo A_{C3} (850 až 930 °C). Po kalení má povrchová vrstva uhlíkových a nízkolegovaných ocelí tvrdost HV = 840 až 900. Cementací se zvyšuje také mez únavy. /1/

2.1.2 Nitridace

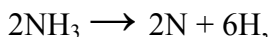
Nitridace je povrchové sycení (obvykle zušlechťených) legovaných ocelí dusíkem, který tvoří s vhodnými legujícími prvky nitridy. Vhodné nitridotvorné legury jsou především hliník, titan, chrom, které tvoří velmi tvrdé nitridy AlN, TiN, CrN, díky nimž lze dosáhnout tvrdosti HV = 1200 až 1400. U obyčejných uhlíkových ocelí se dosahuje tvrdosti maximálně HV = 500. Pokud využijeme pouze tvrdost, je nitridace uhlíkových ocelí zbytečná. Kromě tvrdosti se ale nitridací zvyšuje i únavová odolnost, otěruvzdornost a korozivzdornost.

Dusík reaguje s povrchem materiálu pouze v atomárním stavu N, proto se do pece obsahující kovově čisté předměty vhání čpavek.

Nitridace probíhá v teplotním rozmezí 500 až 600 °C. Důvodem je dokonalý rozklad čpavku při teplotách nad 950 °C, což lze vyjádřit reakcí



při které vzniká netečný N₂, který je vhodný pouze jako ochranná atmosféra. Při teplotách 500 až 600 °C dochází k nedokonalému rozkladu čpavku



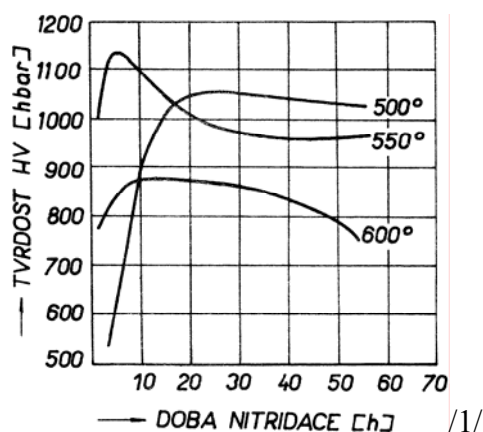
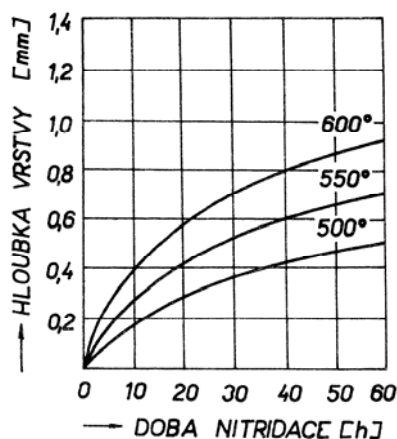
kdy vznikne atomární N, který reaguje s povrchem materiálu.

Pokud je potřeba část součásti chránit před aktivním prostředím, pokryjeme ji mědí, niklem nebo speciálními nátěry. /1/

2.1.2.1 Vliv teploty na průběh nitridace

Na průběh nitridace má největší vliv teplota, která ovlivňuje průběh disociace a difúze. Zvýšením teploty se sice rychlost difúze zvýší, čímž roste hloubka nitridace, ale klesá její tvrdost.

Obrázek č.1 Závislost hloubky vrstvy na době nitridace



Obrázek č.2 Závislost tvrdosti na době nitridace

Snížení tvrdosti při zvýšené teplotě souvisí patrně s velikostí a rozložením nitridů a jejich stálostí. Nitridy, které jsou ve velmi jemné disperzi, působí na zvýšení tvrdosti podstatně více než nitridy, které se při vyšších teplotách globularizovaly. Jde-li o stálost za vyšších teplot, nitridy železa jsou za vyšších teplot méně stálé než nitridy legur.

Jelikož je nitridační teplota pouze v rozmezí 500 až 600 °C, potřebná doba k vytvoření dostatečné nitridační vrstvy se pohybuje v desítkách hodin. /1/

2.1.3 Srovnání nitridace a cementace

Účelem cementace i nitridace je zvýšení povrchové tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Výsledky obou technologických pochodů se od sebe poněkud liší. Nitridací se získají velmi tvrdé, ale ne příliš hluboké vrstvy. Naproti tomu u cementace jsou vrstvy měkčí, hlubší a k jejich vzniku je potřeba kratších časů. Nitridované vrstvy mohou přenášet jen malé specifické tlaky, při vyšších tlacích je nutné použít legované oceli s vysokou tvrdostí jádra.

Cenově je nitridovaná vrstva u tvarově jednoduchých těles dražší než cementace. U složitých součástí je tomu naopak. Proto volba druhu chemicko-tepelného zpracování je složitá a je nutno zvážit všechny požadavky na součást kladené. /1/

2.1.4 Nitrocementace

Nitrocementace je povrchové syčení oceli uhlíkem a dusíkem v plynném prostředí směsí plynů CO a N₂ při teplotě 830 až 860 °C. Nitrocementovaná vrstva se tvoří současnou difúzí uhlíku a dusíku v austenitu. Je vhodná pro uhlíkové i slitinové cementační oceli. Jelikož se sytí uhlíkem, je třeba následně kalit a popouštět.

K nitrocementaci se používá cementační plyn s přídavkem 15 až 30 % čpavku. Za dvě hodiny se získá vrstva o tloušťce asi 0,35 mm. Části, které není třeba nitrocementovat, se chrání galvanickým poměděním. /2/ V dnešní době se ke stejnému účelu používají speciální pasty.

2.1.4.1 Podstata

Nitrocementované vrstvy vznikající za teplot 830 až 860 °C jsou podobné vrstvám cementovaným. Žádoucích mechanických vlastností se dosáhne jejich ochlazením z nitrocementační teploty takovou rychlostí, aby nastala přeměna uhlíko-dusíkového austenitu v martenzit.

Hlavní ekonomický význam má v současné době nitrocementace při teplotách nad 800 °C, které se vedle cementace používají pro zpracování velmi namáhaných součástí, hlavně ozubených kol. /3/

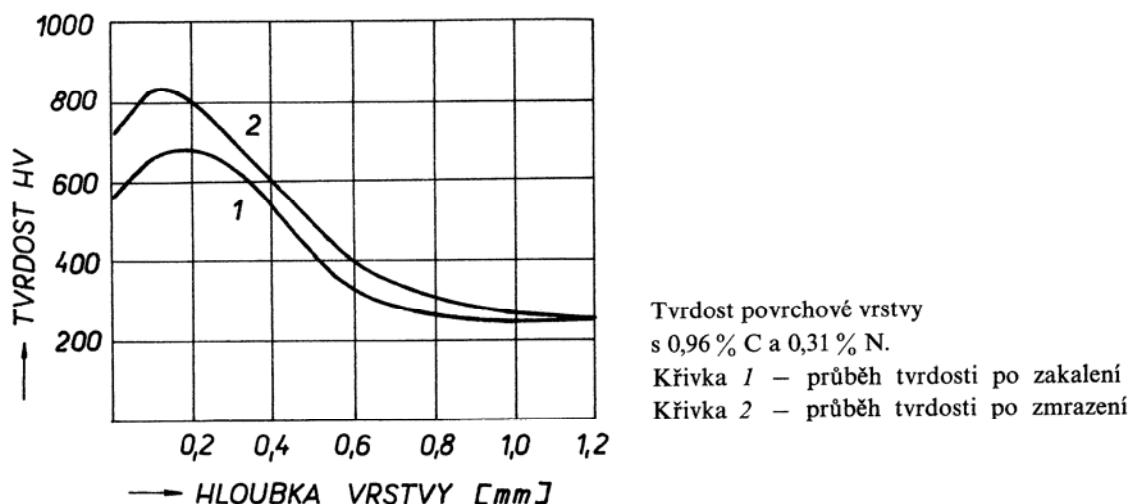
2.1.4.2 Vlastnosti zakalených nitrocementovaných vrstev

Je nutné uvažovat vliv dvou činitelů na tvrdost zakalených nitrocementovaných vrstev, a to aditivní účinek uhlíku a dusíku na tvrdost martenzitu a účinek zbytkového austenitu.

Aditivní účinek uhlíku a dusíku na tvrdost martenzitu je vedlejší. V povrchových oblastech s vysokým obsahem uhlíku a dusíku má převažující vliv na tvrdost struktury vysoký obsah zbytkového austenitu.

V oblastech vzdálenějších od povrchu je obsah zbytkového austenitu poměrně nízký a snižuje významně tvrdost struktury. Obsah dusíku je v těchto oblastech také nízký a tvrdost martenzitu je určována v podstatě jen obsahem uhlíku.

Zbytkový austenit je hlavním činitelem, který ovlivňuje rozložení tvrdosti v zakalených nitrocementovaných vrstvách. Platí, že se u nitrocementovaných vrstev nedosahuje vyšší tvrdosti než u vrstev cementovaných. Naopak v povrchových oblastech bohatých na zbytkový austenit je tvrdost nižší. Je to jev typický pro nitrocementované vrstvy. Nejvyšší tvrdosti nejsou na povrchu, ale v jisté vzdálenosti pod povrchem. Na tvrdost má vliv i teplota podchlazení. Někdy se používá i kalení se zmrazováním, účinek je patrný na obrázku č.3.

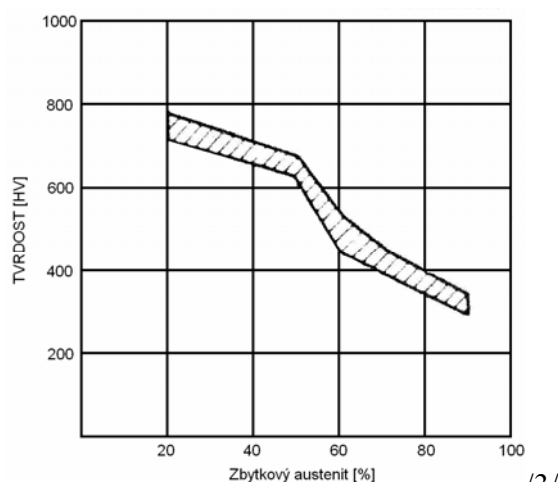


Obrázek č.3 Tvrdost povrchové vrstvy

/1/

Zkušenosti z provozu velmi namáhaných nitrocementovaných ozubených kol ukazují, že nižší tvrdost v povrchových oblastech bohatých na zbytkový austenit není na závadu, není-li pokles tvrdosti příliš velký. Bezpečně lze připustit povrchovou tvrdost 550 až 600 HV, jestliže měkčí povrchové oblasti jsou podloženy oblastmi o tvrdosti alespoň 685 až 700 HV. Této povrchové tvrdosti se dosahuje u různých ocelí odlišným obsahem uhlíku a dusíku v nitrocementované vrstvě.

U nelegované oceli není snížení tvrdosti povrchových vrstev příliš velké ani při obsahu dusíku kolem 0,6 % a obsahu uhlíku kolem 1 %. Jinak je tomu u slitinových ocelí, u kterých se v nitrocementované vrstvě vytvoří značně vyšší obsah zbytkového austenitu. Jak je vidět na obrázku č.4, průběh tvrdosti je se vrůstajícím % zbytkového austenitu klesající.



/3/

Obrázek č.4 Závislost tvrdosti nitrocementovaných vrstev na obsahu zbytkového austenitu

Jestliže překalujeme nitrocementované součásti, pak při austenitizaci na vzduchu uniká z povrchu uhlík i dusík. Pokud s tímto počítáme už při výrobě vrstvy, lze při nitrocementaci připustit větší nasycení podle toho, jak se v povrchových oblastech snížil obsah uhlíku a dusíku. /3/

2.1.4.3 Odolnost nitrocementovaných vrstev proti opotřebení

Nitrocementované vrstvy mají o 40 až 60 % menší opotřebení než vrstvy cementované. /3/

2.1.4.4 Vliv zbytkového austenitu na strukturu vrstvy

Výsledky zkoušek prokázaly, že odstranění části zbytkového austenitu zmrazením vede až k 50 % snížení statické pevnosti v ohybu a o více než 100 % snížení houževnatosti.

Množství zbytkového austenitu v nitrocementovaných vrstvách ovlivňuje zejména rázovou houževnatost nitrocementovaných ocelí s vysokou pevností jádra. Hodnoty jsou srovnatelné s rázovou houževnatostí klasických ocelí cementačních.

Přítomnost zbytkového austenitu, který má menší specifický objem než martenzit, na druhé straně snižuje hladinu tlakových pnutí ve vrstvě. /3/

2.1.4.5 Výhody nitrocementace

Přítomnost dusíku v nitrocementovaných vrstvách je příčinou rozdílů, kterými se nitrocementované vrstvy liší od vrstev cementovaných. Některé z těchto rozdílů mají praktický význam. Lze je shrnout následujícím způsobem.

Při současné difúzi uhlíku a dusíku v austenitu se účinkem dusíku urychluje difúze uhlíku. Rychlost růstu nitrocementovaných vrstev při teplotě 850 až 860 °C se proto při menších tloušťkách (asi do 0,4 mm) blíží rychlosti růstu cementovaných vrstev. Nižší teplota nitrocementace přispívá ke snížení deformací, prodlužuje životnost pecních zařízení a zejména umožňuje přímé kalení po nitrocementaci i u ocelí, které nemají v podmínkách cementace zaručené jemné austenitické zrna. Vzhledem k tomu, že proces probíhá za nižších teplot, není při přímém kalení po nitrocementaci nutné ochlazovat součásti na nižší teplotu kalení.

Při nitrocementaci za teplot nižších než teplota A_3 jádra se v důsledku toho hranice austenitické oblasti posouvá k nižším obsahům uhlíku. Tím se usnadňuje difúze uhlíku v neúplně austenitizované základní hmotě. Proto, na rozdíl od cementace,

nedochází při nitrocementaci za teplot nižších než A_3 jádra k brzdění růstu vrstvy a k vytváření ostrého přechodu do jádra.

Nitrocementované vrstvy mají nižší kritickou rychlost ochlazování než vrstvy cementované. Nižší kritická rychlost ochlazování vrstev umožňuje kalit nitrocementované součásti z nelegované oceli do oleje.

Dusík zvyšuje obsah zbytkového austenitu ve struktuře zakalených nitrocementovaných vrstev. Zbytkový austenit na jedné straně snižuje tvrdost vrstvy a jeho obsah je omezen nejnížší přípustnou tvrdostí povrchu. Na druhé straně však přítomnost zbytkového austenitu v martenzitické struktuře zakalených nitrocementovaných vrstev brzdí vznik únavových poruch a zvyšuje únavovou pevnost nitrocementovaných součástí.

Kromě toho zvyšuje přítomnost zbytkového austenitu ve struktuře vrstvy její plasticitu. Vzdělání plasticity vrstvy vede ke zvýšení rázové houževnatosti a v menší míře i ke zvýšení pevnosti v ohybu nitrocementovaných oceli. Větší plasticita nitrocementovaných vrstev umožňuje dosáhnout optimální houževnatosti i u součástí z oceli s pevností jádra 170 až 200 MPa. Použití těchto ocelí otevřelo významnou oblast nitrocementace vysokonamáhaných ozubených kol a hřídelí. Velká pevnost jádra dovoluje podstatně snížit tloušťku vrstvy při rovnocenné nosnosti a odolnosti proti kontaktní únavě. Např. u ozubených kol, která byla dříve při pevnosti jádra 90 až 120 MPa cementována na tloušťku 0,8 až 0,9 mm, postačí při pevnosti jádra kolem 170 MPa tloušťka nitrocementované vrstvy 0,25 až 0,30 mm. V takových případech umožňuje nitrocementace ve srovnání s cementací zkrátit doby pochodu i o 60 až 70 %.

/3/

2.1.4.6 Nevýhody nitrocementace

Ve srovnání s přednostmi nitrocementace jsou její nevýhody méně závažné. Patří k nim především technologická náročnost pochodu, při kterém je nutné dodržet nauhličovací i nitridační schopnost plyné atmosféry ve vhodných mezích. Za nevýhodu je možné považovat i to, že hloubka vrstev je při nitrocementaci omezena časovou závislostí rychlosti růstu prakticky na 0,7 až 0,8 mm. /3/

2.2 POPOUŠTĚCÍ KŘEHKOST

Křehkost je vlastnost protichůdná k houževnatosti a tvářitelnosti. Z praktického hlediska je důležité, aby ocelové součásti vykazovaly před lomem nebo v jeho průběhu (při šíření trhlin) maximální plastickou deformaci.

Při plastické deformaci se spotřebovává značné množství energie a jestliže nutná energie není k dispozici, nedojde k porušení nebo šíření trhlin. V případě křehkého porušení je energie potřebná k lomu zcela minimální, což znamená, že při zatížení součásti dojde okamžitě k překročení kritické deformace, a tím k lomu.

Z praxe je jasné, že zatěžování součástí není rovnoměrné a navíc každá součást má v sobě větší nebo menší vnitřní pnutí, které se vektorově sčítá s vnějším zatížením.

Křehkost součástí může mít několik příčin:

- specifické vlastnosti materiálu,
- působení okolních vlivů jako je teplota nebo napadení povrchu okolním prostředím, v němž součást pracuje,
- způsob a druh zatěžování, může jít o statické zatěžování nebo cyklické namáhání, nebo dokonce o nepravidelné proměnné zatížení, které je v praxi nejběžnější,
- u proměnného zatěžování záleží velmi na rychlosti změn. Se zvyšující se rychlostí zatěžování se zvyšuje sklon ke křehkému lomu,
- rozměr dané součásti. Platí, čím je součást větší, tím je pravděpodobnější existence vady kritické velikosti. Větší součást do sebe akumuluje při zatěžování větší elastickou energii, která se při lomu začne uvolňovat a přispívat tak destrukci součásti.

K objasnění popouštěcí křehkosti přispěly zkoušky vrubové houževnatosti provedené na vzorcích ze stejné oceli, které byly popouštěny na různé teploty.

Tyto zkoušky ukázaly, že existují dvě minima hodnot popouštěcí křehkosti. První minimum je v oblasti teplot kolem 270 °C a druhé při teplotách kolem 550 °C.

Oba typy křehkosti se liší. Podle teploty vzniku se nazývají vysokoteplotní a nízkoteplotní popouštěcí křehkost. /4/

2.2.1 Vysokoteplotní popouštěcí křehkost

Jev vysokoteplotní popouštěcí křehkosti je poměrně složitý, a to jak ve své kinetice rozvoje, tak i ve vlivu jednotlivých legujících prvků. Popouštěcí křehkost může

být vyvolána jak pomalým ochlazováním z teplot pod A_1 , tak izotermickým žháním při těchto teplotách. Jev popouštěcí křehkosti lze vyvolat a opět zrušit na téže součásti několikrát a pro tuto vlastnost bývá nazývána vratnou popouštěcí křehkostí. Vzniká při teplotách okolo 550 °C.

Pokud jde o chemické složení, byla provedena řada prací k objasnění vlivu jednotlivých prvků. Výsledky si mnohdy odporují, protože legující prvky působí různě v různé základní bázi.

Rovněž vliv původního tepelného zpracování je zajímavý. Hrubé zrno zvětšuje sklon k popouštěcí křehkosti a mikrostruktura v pořadí ferit, bainit a martenzit vykazuje stoupající náchylnost k tomuto jevu. /4/

2.2.1.1 Vliv popouštěcí křehkosti na mikrostrukturu

Lom vzorků s popouštěcí křehkostí probíhá převážně po hranicích zrn. Je tedy důležité zkoumat děje probíhající v těchto oblastech.

V průběhu času se názory na to, co způsobuje popouštěcí křehkost, upravovaly i podle toho, jak se vyvíjela technika mikroskopie. Za první příčinu popouštěcí křehkosti se pokládaly karbidy na hranicích původních austenitických zrn. Tato příčina byla vyvrácena nalezením stejných karbidů u vzorků nezkřehlých pomocí elektronového mikroskopu. Dalším předpokladem byl výskyt precipitátu na hranicích zrn, ovšem tato hypotéza se také nepotvrdila, protože precipitát nebyl na hranicích zrn vůbec nalezen. Většina odborníků se proto přiklonila k teorii vzniku segregátu. Podle předpokladů je na hranicích zrn zvýšená difúze, segregace proto může probíhat jak ve stavu austenitickém, tak feritickém. Segregace je způsobena snížením energie potřebné k rozpuštění daného prvku a snahou o vyrovnání chemické aktivity prvku v celém zrně.

Hlavním prvkem, který přichází v úvahu jako příčina popouštěcí křehkosti, je fosfor. Důkazem je pokus, při kterém byla vyrobena čistá slitina, která nevykazovala sklon k popouštěcí křehkosti. Po přidání fosforu se sklon k popouštěcí křehkosti projevil. /4/

2.2.1.2 Vliv popouštěcí křehkosti na vrubovou houževnatost

Jak je uvedeno výše, lom probíhá po hranicích zrn. U vzorků s vyvinutou popouštěcí křehkostí bylo zjištěno, že po objevení první trhliny se lámou křehce, prakticky bez spotřeby další energie. (Zkoušky byly provedeny sice na vzorcích pomalým ohybem, ale není důvod předpokládat, že by se při rázu chovaly jinak).

Jestliže se práce potřebná pro přelomení zkušebního tělíska rozloží na práci nutnou k nukleaci trhliny kritické velikosti a práci nutnou k jejímu šíření, působí tedy popouštěcí křehkost na snížení práce nutné k šíření lomu. /4/

2.2.2 Nízkoteplotní popouštěcí křehkost

Tento druh křehkosti se vyskytuje u zakalených ocelí popuštěných na teplotu v rozmezí 200 až 350 °C. Tato křehkost je nevratná a nelze ji omezit prudkým ochlazením ani žiháním.

Další zajímavostí je, že některé prvky jako křemík, hliník nebo fosfor posouvají pásmo křehkosti o 100 °C výše.

Příčinou nízkoteplotní popouštěcí křehkosti je precipitace cementitu na hranicích původních austenitických zrn.

U ocelí s obsahem uhlíku nižším než 0,25 % precipituje cementit na hranicích subzrn od teploty 230 °C, po popouštění na 260 °C nastává částečné rozpuštění karbidů na hranicích subzrn a současně probíhá vznik karbidického filmu na hranicích martenzitu a precipitace kulových částic v martenzitu.

U ocelí s obsahem uhlíku nad 0,25 % vzniká po popouštění na teplotu 150 až 200 °C na hranicích subzrn martenzitu síťový ϵ -karbidu. Při zvýšení teploty popouštění až na 315 °C se síťový ϵ -karbidu rozpouští a současně vznikají destičky a globule cementitu na hranicích martenzitu. Při dalším zvyšování teploty popouštění počet částic roste a probíhá jejich sferoidizace na hranicích zrn martenzitu. /4/

Diplomová práce se zabývá nevratnou nízkoteplotní popouštěcí křehkostí, protože se v podniku Narex, a.s. používají popouštěcí teploty právě v rozmezí 160 až 345 °C.

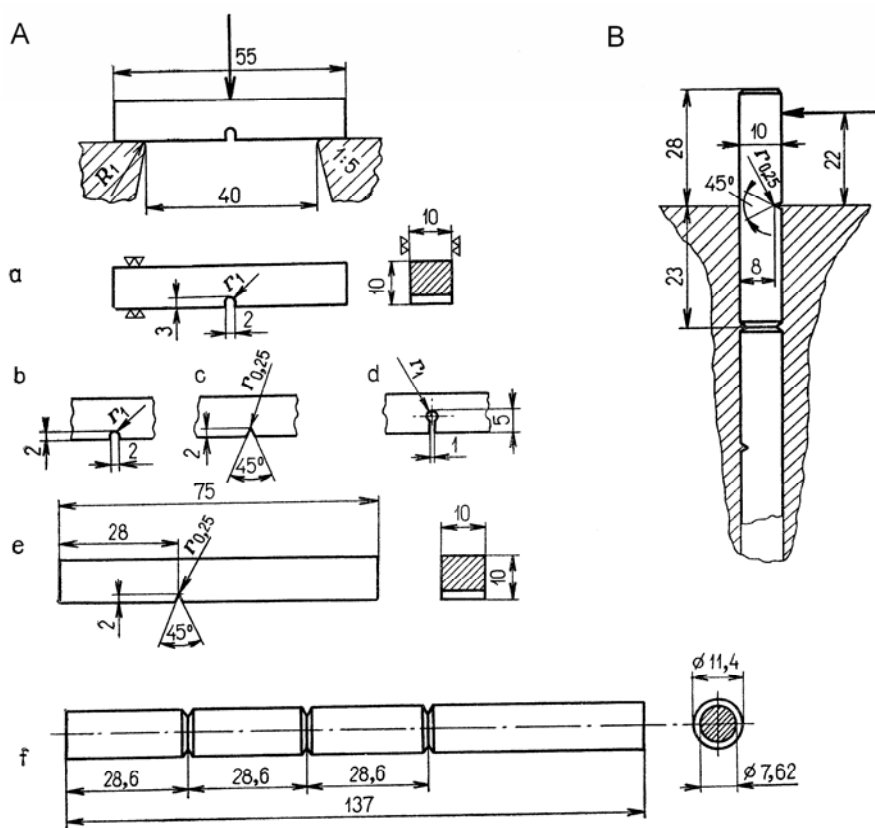
2.3 ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Houževnatost je práce potřebná k rozdělení jakékoli hmoty na dvě části. Kovy jsou většinou houževnaté a mírou jejich houževnatosti je práce přetvárná, protože rozdělení předchází větší či menší přetvoření. /5/

2.3.1 Rázová zkouška v ohybu

Tato zkouška má největší význam, používá se hlavně u ocelí. Vzhledem k tomu, že je ocel velice houževnatý materiál, nemuselo by dojít k přeražení zkušebního tělíska, ale jen k jeho plastické deformaci, proto se opatřuje zkušební tyčka vrubem. Ve vrubu se po nárazu koncentruje napětí a vzniká oblast složité napjatosti, což zvyšuje pravděpodobnost křehkého porušení.

Podle tvaru vrubu a podle způsobu uložení tyče, na níž dopadá ráz, se dělí rázové zkoušky na zkoušky podle Charpyho a zkoušky podle Izoda. /6/



Rázová zkouška ohybem
A — zkušební tyč na dvou podporách (metoda Charpyho), B — zkušební tyč uchycená letmo (metoda Izodova).

Tvary a rozměry zkušebních tyčí: a — ČSN (DVM), b — Mesnager, c — Charpy, d — ASTM, e — Izod — prismatická tyč, f — Izod — násobná tyč s kruhovým průřezem

/6/

Obrázek č.5 Tvar a rozměry vrubových tělísek u zkoušky podle Charpyho a Izoda

2.3.1.1 Provedení Charpyho zkoušky

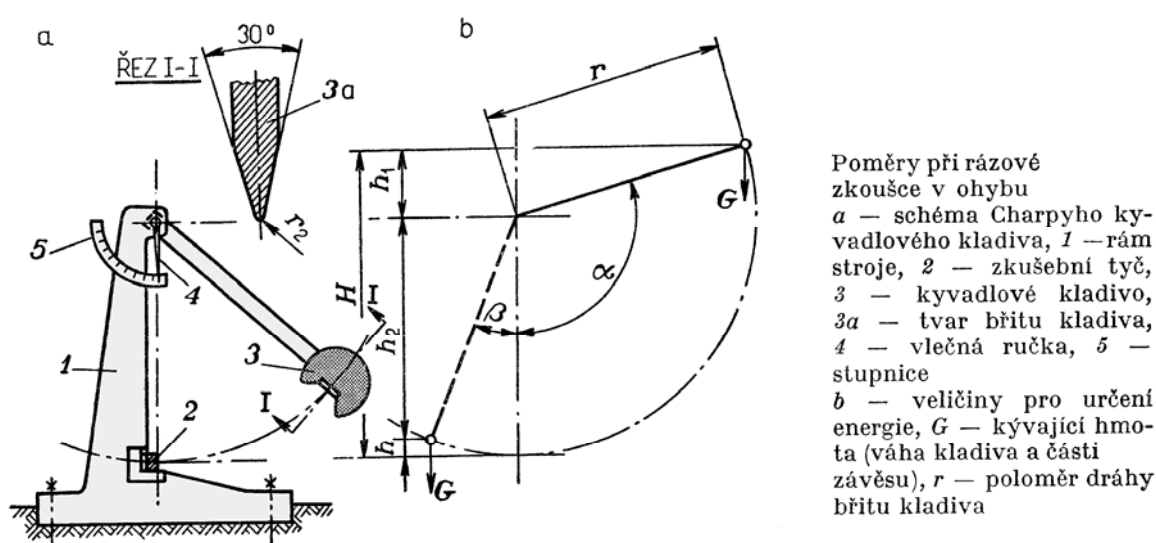
U zkoušek podle Charpyho je vztažena spotřebovaná práce na nejmenší průřez zkušební tyčky v místě vrubu.

$$R = \frac{L_r}{S_0} \quad \left[\frac{J}{cm^2} \right],$$

kde L_r je nárazová práce potřebná k přeražení tyče [J]

$$L_r = m \cdot g \cdot (H - h) \text{ podle následujícího obrázku}$$

S_0 je průřez v místě vrubu



Obrázek č.6 Uspořádání u Charpyho zkoušky

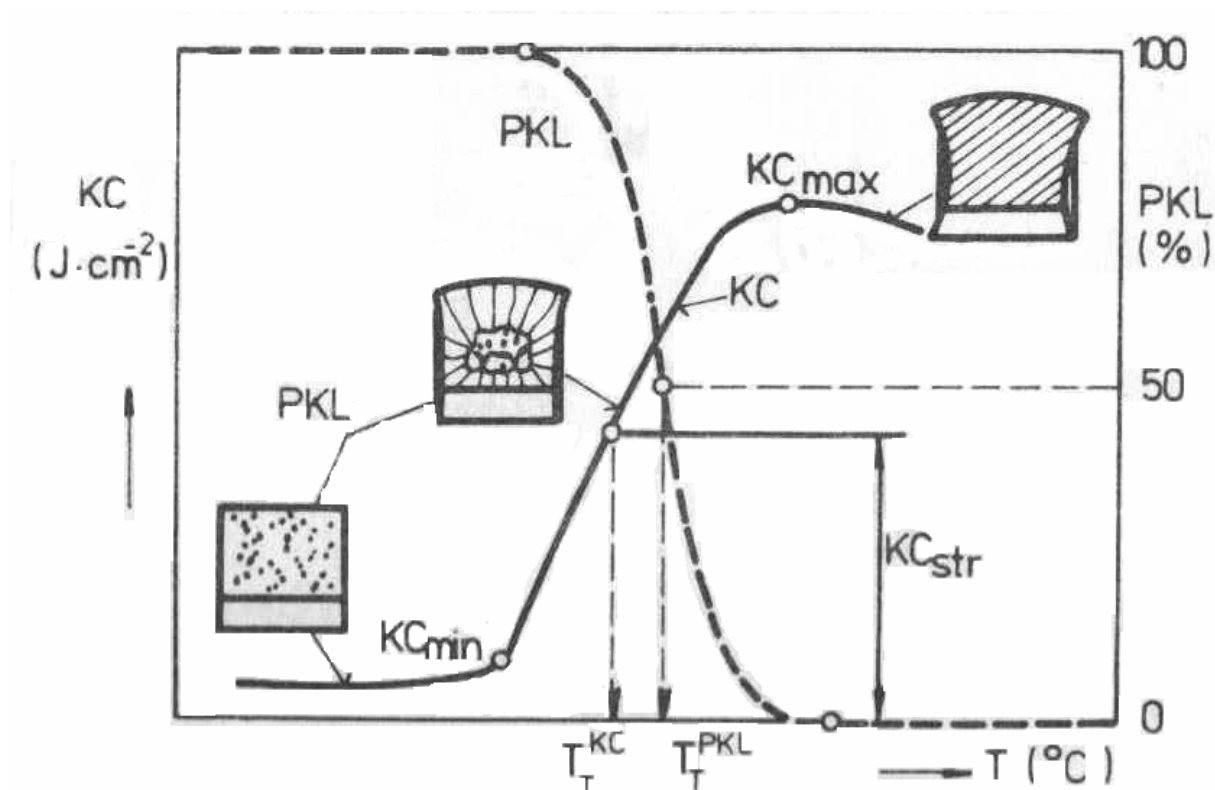
/6/

Zkouška je normalizovaná a provádí se kyvadlovým kladivem (ČSN EN 10045-2) na zkušební tyči (ČSN EN 10045-1) o rozměrech 55x10x10 mm s danými tolerancemi opatřené vrubem tvaru U nebo V, úhel vrubu V je $45^\circ \pm 2^\circ$. Teplota během zkoušky se pohybuje v rozmezí $23^\circ C \pm 5^\circ C$. Pokud zkouška probíhá za jiných teplot (vyšších nebo nižších), tak přeražení musí proběhnout do 5 s od vyjmutí zkušební tyče z prostředí.

Zkouška se používá mimo jiné i k určování tranzitní teploty. /7/

Vrubová houževnatost jako kritérium odolnosti proti křehkému lomu má praktický význam v podobě tranzitní křivky. Snižováním teploty zkušebního tělíska v určitém intervalu teplot dojde k náhlému poklesu houževnatosti z maximální KC_{max} na minimální hodnotu KC_{min} . Tento interval se nazývá přechodová oblast. Obrázek č.7

představuje obecnou přechodovou křivku. Tranzitní teplota T_T je teplota, která odpovídá střední hodnotě $KC_{stř}$.



Obrázek 7. Obecná přechodová křivka vrubové houževnatosti

/8/

Na obrázku 7. jsou znázorněny i plochy křehkého lomu PKL , které jsou také závislé na teplotě.

Hodnota $KC_{stř}$ je určena středním průměrem hodnot KC_{max} a KC_{min} .

$$KC_{stř} = \frac{KC_{max} + KC_{min}}{2}. \text{ Z této hodnoty se určuje tranzitní teplota. /8/}$$

2.4 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Tvrdość - mechanická vlastnost materiálu vyjádřená odporem proti deformaci jeho povrchu vyvolané působením geometricky definovaného tělesa.

Tvrdość materiálu se mění podle jeho čistoty, struktury, stavu, aj. /8/

2.4.1 Vickersova metoda

Princip spočívá ve vtlačování diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do zkoumaného materiálu. Tvrdość podle Vickerse se označuje HV a je dána poměrem síly F a povrchu vtisku S ,

$$HV = \frac{F}{S},$$

plocha vtisku se dá vypočítat podle vzorce

$$S = \frac{u^2}{2 \cdot \cos 22^\circ},$$

kde u je střední hodnota úhlopříčky vtisku (mm)

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2},$$

po dosazení a úpravě vychází vztah

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{u^2}.$$

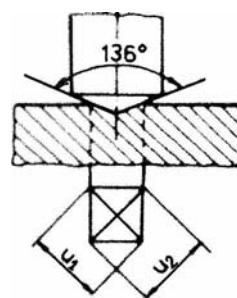
Výhodou této zkoušky je, že výsledky tvrdosti nezávisí na velikosti zatěžující síly, protože různě velké vtisky jsou si geometricky podobné. Při použití velmi velkých, nebo velmi malých zatěžujících sil závisí hodnoty HV na odpružení, resp. na deformačním zpevnění zkoušeného materiálu. Stálost hodnoty tvrdosti při změnách zatížení potvrzuje Kickův zákon podobnosti

$$F = a \cdot u^2,$$

kde F je zatěžující síla,

a je konstanta závislá na zkoušeném materiálu a na tvaru vtlačovaného tělesa,

u je úhlopříčka vtisku. /8/



Obrázek č.8 Princip metody /8/

2.4.1.1 Volba zatěžující síly

Zkouška probíhá 10 až 15 s, při zatížení 294 N. Podle odhadované tvrdosti lze však užít zatěžující sílu v rozmezí 9,8 až 980 N. Případně se dá upravit i délka zatěžování. V případě nepoužití normalizovaného formátu zkoušky (294 N po dobu 10 s) se tento fakt musí uvést do označení zkoušky (HV F/t - např. HV 50/30 je označení pro $F = 490\text{ N}$ a $t = 30\text{ s}$). /8/

2.4.1.2 Přesnost metody

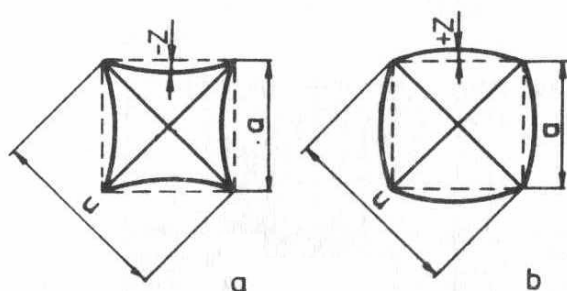
Přesnost výsledků závisí především na přesnosti použitého přístroje, kvalitě povrchu zkoušené součásti, homogenitě vlastností a struktuře materiálu. /8/

2.4.1.3 Korekce při deformovaném vtisku

U deformovaného vtisku se provádí korekce pomocí vztahu

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{\left(u \pm z\sqrt{2}\right)^2},$$

kde z je výška vrchlíku, viz. obrázek č.9



Deformace okrajů vtisku

a - měkký materiál
b - tvrdý materiál

/8/

Obrázek č.9 Deformace vtisku u různých materiálů

2.4.1.4 Použití metody pro určování mikrotvrdosti

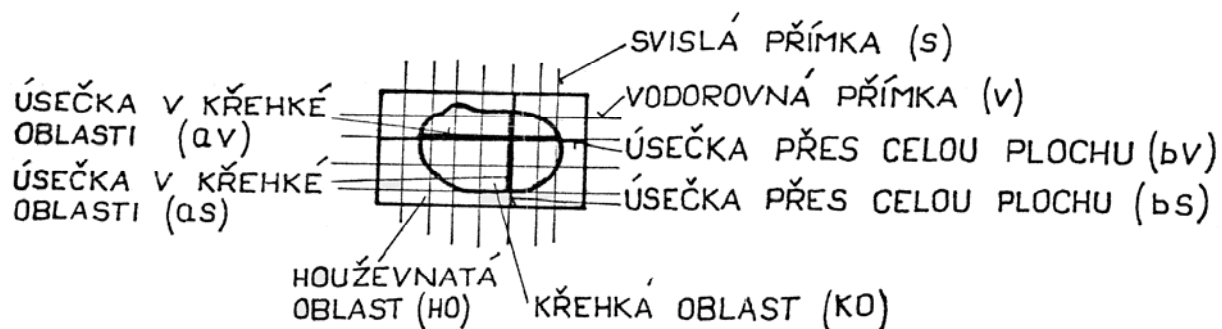
Výhodou této zkoušky jsou velmi malé vtisky, proto se dá použít i na načisto obrobené povrchy, jako jsou ozubená kola, ložiska aj. Dále lze tuto metodu použít na měření tenkých předmětů a vrstev (cementovaných, nitridovaných apod.).

Metodu lze použít i na zjišťování tvrdosti jednotlivých fází v ocelích i na měření tloušťky nacementované vrstvy. /8/

2.5 HODNOCENÍ PODÍLU KŘEHKÉ MORFOLOGIE LOMOVÉ PLOCHY

Při hodnocení výsledků zkoušky vrubové houževnatosti je důležité určit procentuální podíl křehkého lomu v celé lomové ploše. /9/

2.5.1 Kavalieriho metoda



Obrázek č.10 Znázornění principu Kavalieriho metody

/9/

Základní myšlenkou je nahodilé položení čtvercové sítě na zkoumanou plochu.

Postup : 1. součet všech délek **aV** všech délek **aS**

2. součet všech délek **bV** všech délek **bS**

3. podíl obou hodnot

$$P = \frac{\sum aV + \sum aS}{\sum bV + \sum bS} \cdot 100 \quad [\%],$$

čímž se získá přibližná hodnota zastoupení křehkého lomu v procentech na celé lomové ploše. Tato hodnota velmi rychle konverguje k přesné hodnotě při zjemňování rastru. /9/

2.5.1.1 Stanovení největšího přípustného rastru

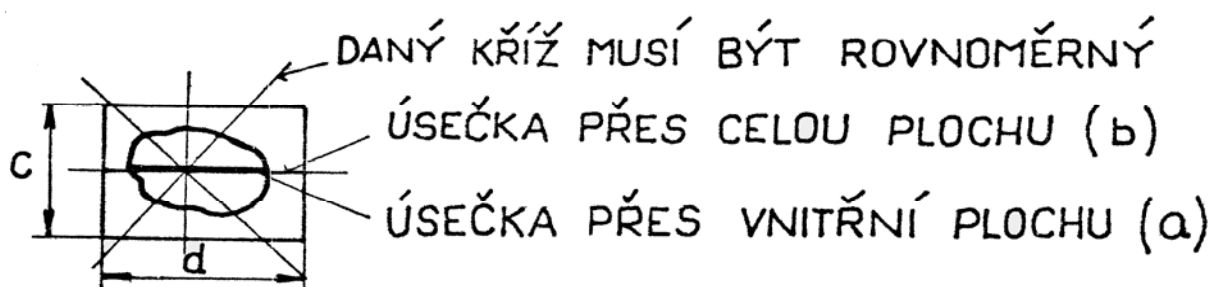
Požadavek : přijatelná přesnost ($\pm 2 \%$)

co nejmenší pracnost

Experimentálně bylo zjištěno, že velikost rastru je závislá na velikosti zkoumané plochy. Pro splnění požadavků je dostačující rastr o straně 15% délky základny. Hodnoty **c** a **d** jsou délky stran zkoumané plochy a **r** je vzdálenost mezi dílky rastru.

$$r = 0,15 \cdot \frac{c + d}{2} \quad [\text{mm}] \quad /9/$$

2.5.2 Metoda "kříže"



Obrázek č.11 Znázornění principu metody "kříže"

/9/

Základem je položení osového kříže na zkoumanou plochu tak, aby jeho střed byl přibližně ve středu vnitřní plochy obrazce.

Počet os kříže se pohybuje od 4 až k 10 osám, viz příloha č.1

Princip:

- zjištěné délky **a**, **b** na daném počtu os kříže se dosadí do vzorce:

$$P = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2} \cdot 100 = \frac{\sum a_i^2}{\sum b_i^2} \cdot 100 \quad [\%].$$

Porovná se součet čtverců **a_i** se součtem čtverců **b_i**

$$P = \frac{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum a_i \right)^2}{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum b_i \right)^2} \cdot 100 = \frac{(\sum a_i)^2}{(\sum b_i)^2} \cdot 100 \quad [\%].$$

Výsledky testů ukázaly, že je možno použít tyto vztahy s přesností lepší než 4 % bez ohledu na počet os. Jako optimální se jeví kříž s 8 osami. /9/

2.5.3 Přesnost užitých metod

Kavaleriho metoda je přesnější. Umožňuje snadno a rychle odečítat délkové rozměry při použití milimetrového papíru jako rastru.

Stačí-li přesnost $\pm 4 \%$, lze použít metodu kříže se 4 osami a vztah $P = \frac{(\sum a_i)^2}{(\sum b_i)^2} \cdot 100$.

Při tomto počtu os je metoda méně náročná než Kavaleriho. /9/

2.5.4 Shrnutí k oběma metodám

Metody jsou založené na subjektivním pozorování lomové plochy. Rozlišení, zda jde o vizuálně houževnatý nebo vizuálně křehký lom, je na pozorovateli a na jeho schopnosti posoudit zkoumanou plochu.

Zkoumání probíhá na obraze lomové plochy, který lze pořídit mikroskopem nebo fotoaparátem.

3. Experimentální část

3.1 MATERIÁL

3.1.1 Základní rozbor materiálu 16MnCr5

V diplomové práci byl zkoumán materiál 16MnCr5, což je ocel konstrukční nízkolegovaná určená k cementaci. V Narexu, a.s. je využíván zhruba na 90 % výrobků.

Jelikož materiál obsahuje 0,14 až 0,19 % uhlíku, je vhodný k cementaci.

Materiál dále obsahuje mangan v množství 1 až 1,3 %. V tomto množství nemá významnější účinky na tvrdost.

Obsah chromu je 0,8 až 1,1 %. V tomto množství zvyšuje pevnost, prokalitelnost a houževnatost po zušlechtnění. /10/

Složení podle normy:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,14-0,19	max 0,40	1,00-1,30	max 0,035	max 0,035	0,80-1,10

Přesné složení je v příloze č.2. Jedná se o atest vyhotovený výrobcem, firmou HES.

3.1.1.1 IRA diagram

Jelikož se nepodařilo získat IRA diagram oceli 16MnCr5, je v příloze č.3 přiložen IRA diagram oceli ČSN 414220, která je podle materiálového listu srovnatelná s ocelí 16MnCr5. Materiálový list oceli 16 MNCr5 je také součástí přílohy č.3.

3.1.2 Příprava pro metalografickou analýzu

Pro přípravu výbrusů byl materiál oddělován rozbrušováním na zařízení RATHENOW - Metasecar rozbrušovacím kotoučem 250x1,8x32 mm - A80MB HH-95-B2202-010. Rozbrušování probíhalo za mokra při kývavém pohybu za použití chladicí emulze GRINDEX 10 o koncentraci 1,6 až 3 %. Chladicí emulze brání tepelnému ovlivnění rozbrušovaného materiálu.

Pro metalografickou analýzu byly vzorky zality za studena směsí VARIDUR 20 do formičky velikosti D25/25, vytvrzení trvalo cca 8 minut. Dále byl upraven jejich povrch, a to broušením a leštěním.

Byly použity brusné papíry BUEHLER SiC o průměru 230 mm s drsností 180, 240, 400, 800 a 1200.

Cílem broušení je dosáhnout rovinného povrchu s minimálním poškozením, které se snadno a rychle odstraní leštěním. Broušení se dělí na :

- 1) rovinné broušení PG (Plane Grinding). To složí k hrubému zarovnání povrchu vzorku do roviny. Může dojít i k odstranění celých nežádoucích vrstev (rez, okuje). Používají se hrubé, pevně uchycené brusné částice.
- 2) jemné broušení FG (Fine Grinding). Vytváří povrch s deformacemi, které se dají odstranit leštěním. Při tomto broušení se používají jemné částice brusiva uchycené na brusném papíře.

Leštění bylo prováděno pomocí emulze Topol 1 od firmy BUEHLER, což je suspenze Al_2O_3 ve vodě. Po vyleštění byly vzorky leptány. Leptání probíhalo v Petriho miskách v 2 % roztoku NITALU po dobu přibližně 10 sekund. Poté byly vzorky omyty lihem a osušeny. Líh byl použit, proto aby nedocházelo k dalšímu nežádoucímu naleptávání struktury.

Takto připravené vzorky byly dále zkoumány.

3.1.2.1 Velikost zrna

Pro určení velikosti zrna základního materiálu byla použita norma ČSN EN ISO 643.

Postup:

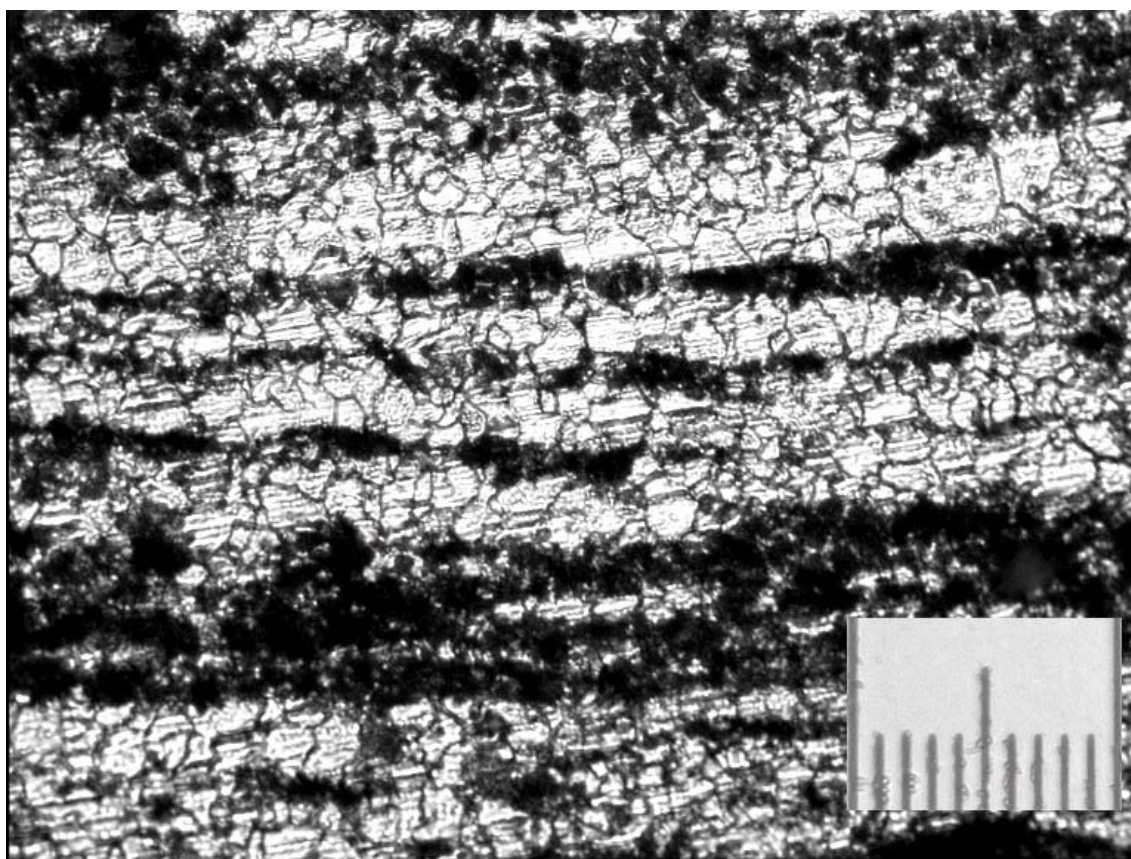
- 1) na fotografii (obrázek č.12) byla odhadnuta velikost zrna podle normy,
- 2) byl použit vzorec $G = M + 6,64 \cdot \log \frac{g}{100}$,

G je skutečná velikost zrna,

M je velikost zrna odhadnutá podle normy,

g je rozlišení mikroskopu, kterým byla pořízena fotografie.

Při snímání byl použit objektiv se zvětšením 637,5x a odhadnutá velikost podle normy je 4, po dosazení do vzorce vyšla velikost zrna základního materiálu 9,3, takže se jedná o jemnozrnnou ocel. Obrázek č.12 zobrazuje materiál v dodaném stavu, vzorek byl leptán NITALEM 2 %.

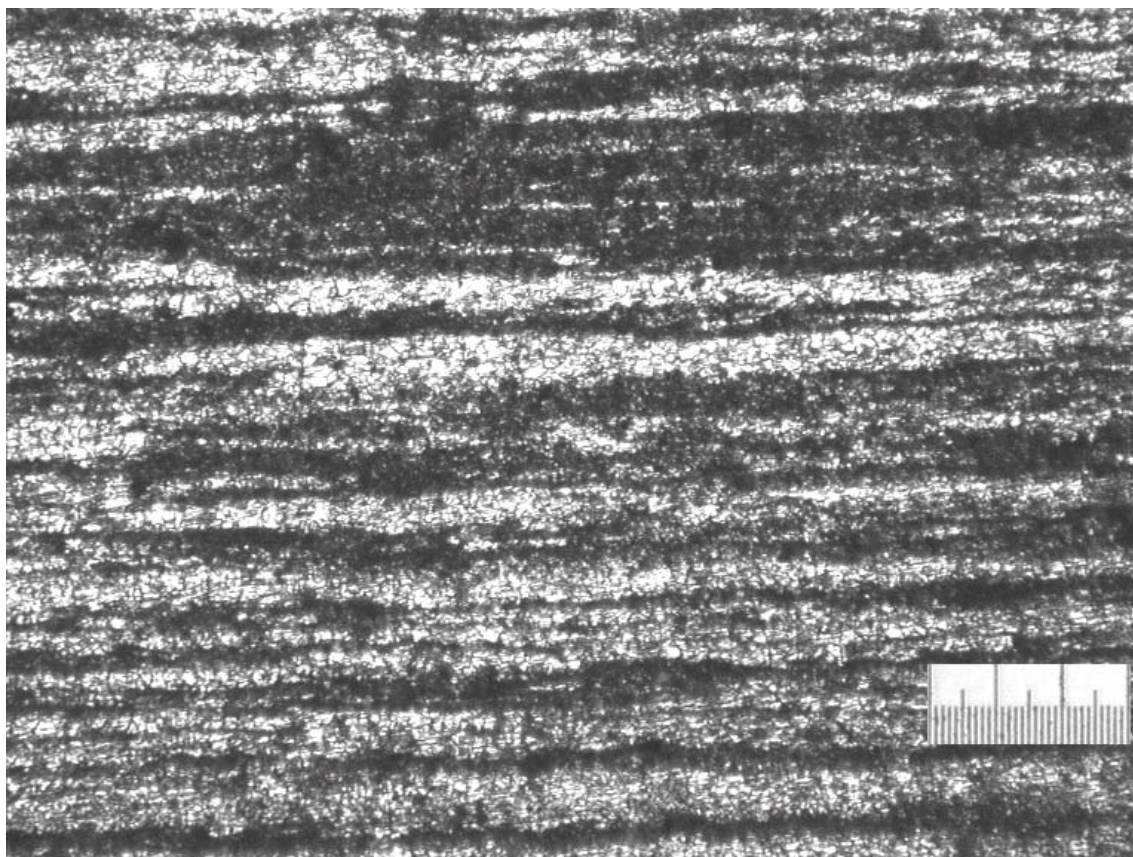


Obrázek č.12 Materiálu 16MnCr5 bez tepelného zpracování

1 dílek = 0,01 mm

3.1.2.2 Struktura materiálu v dodaném stavu

Byl zhotoven výbrus ze základního materiálu, na kterém se ukázala řádkovitost odpovídající 5. stupni podle normy ČSN 42 0469. Řádkovitost byla určena z obrázku č.13. Vzorek byl leptán NITALEM 2 %.



Obrázek č.13 Struktura materiálu v dodaném stavu

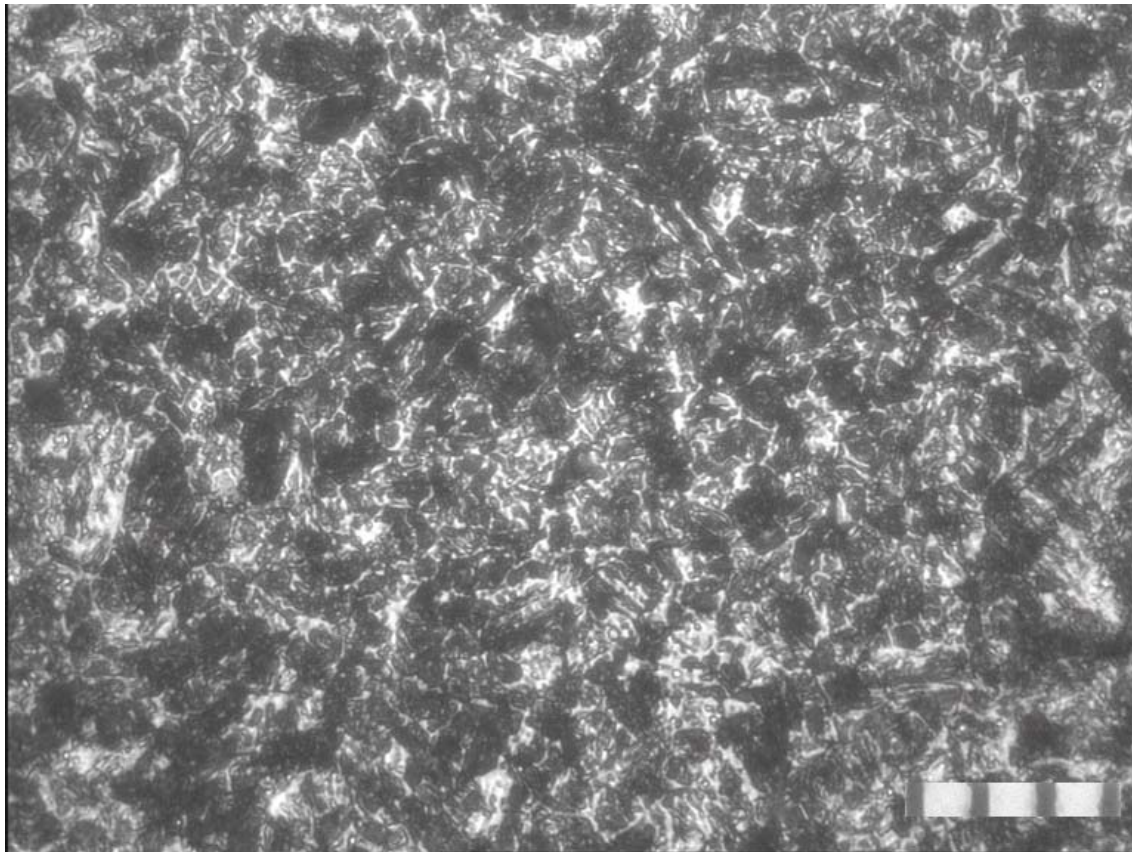
1 dílek = 0,01 mm

Řádkovitost je strukturální nestejnorodost zhoršující jakost oceli. U podeutektoidních ocelí bývá fosfor příčinou odmíšení, a tím i řádkovitosti. Z oblastí s vyšším obsahem fosforu je vypuzován uhlík. Tím vznikají oblasti chudé na uhlík, skládající se z feritu, a oblasti bohatší na uhlík, skládající se z perlitu. Tvářením takových ocelí se strukturní nestejnorodost projeví řádkovitostí. /11/

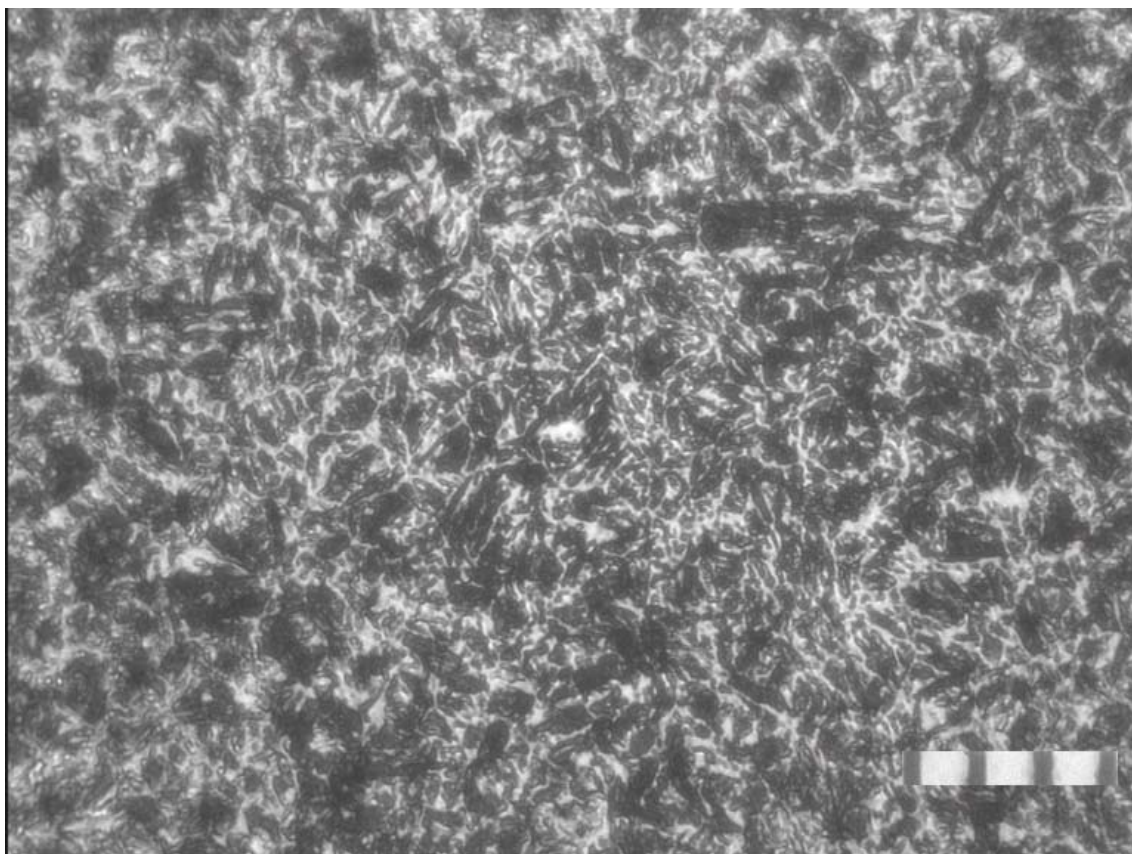
Řádkovitost se po tepelném zpracování ztratila díky tomu, že se překročí homogenizační teplota, při které se složení materiálu zrovnoměrní, jak je vidět dále na obrázcích č.14 až 17.

3.1.2.3 Struktura materiálu po tepelném zpracování

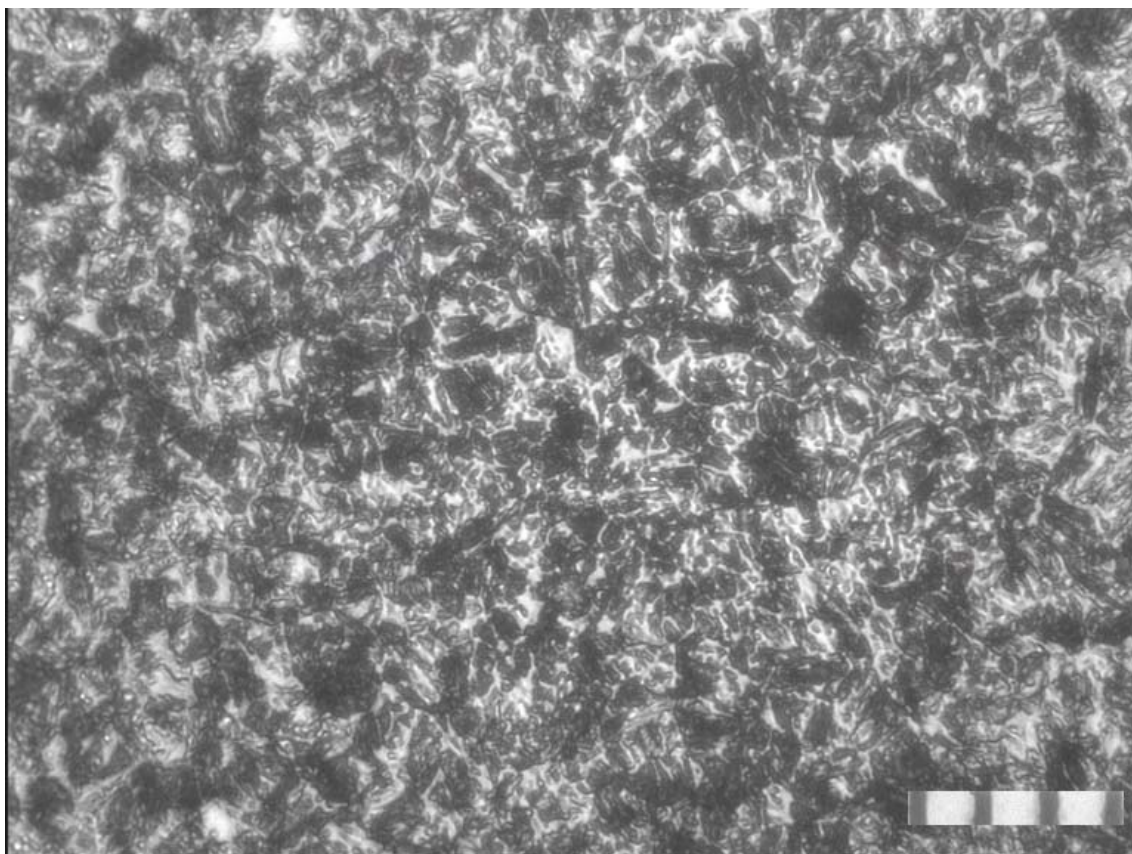
Byly zhotoveny výbrusy ze vzorků tepelně zpracovaných a popouštěných při teplotách 213, 239, 390 a 430 °C. Struktury na obrázcích č.14 až 17 jsou bainitického charakteru s rozdílným stupněm rozpadu bainitu. Vzorky byly leptány NITALEM 2%.



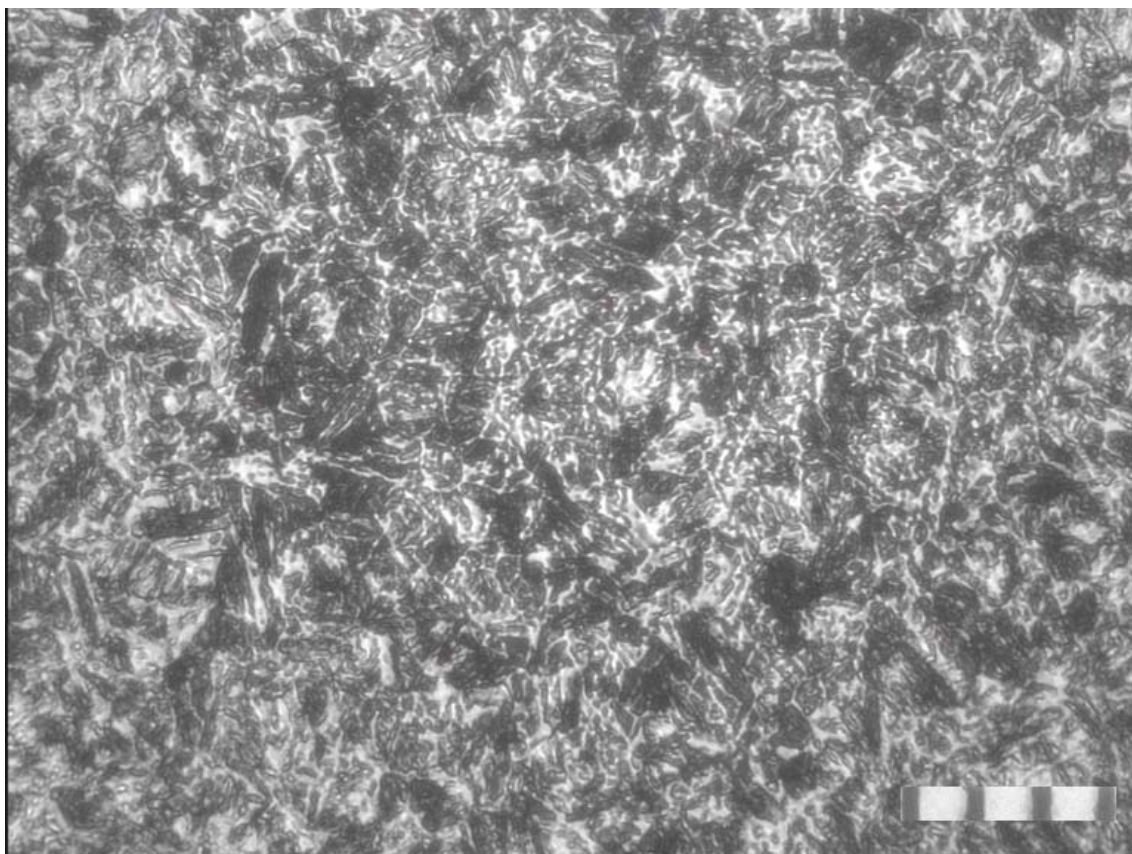
Obrázek č.14 Struktura jádra materiálu po popouštění při 213 °C 1 dílek = 0,01 mm



Obrázek č.15 Struktura jádra materiálu po popouštění při 239 °C 1 dílek = 0,01 mm



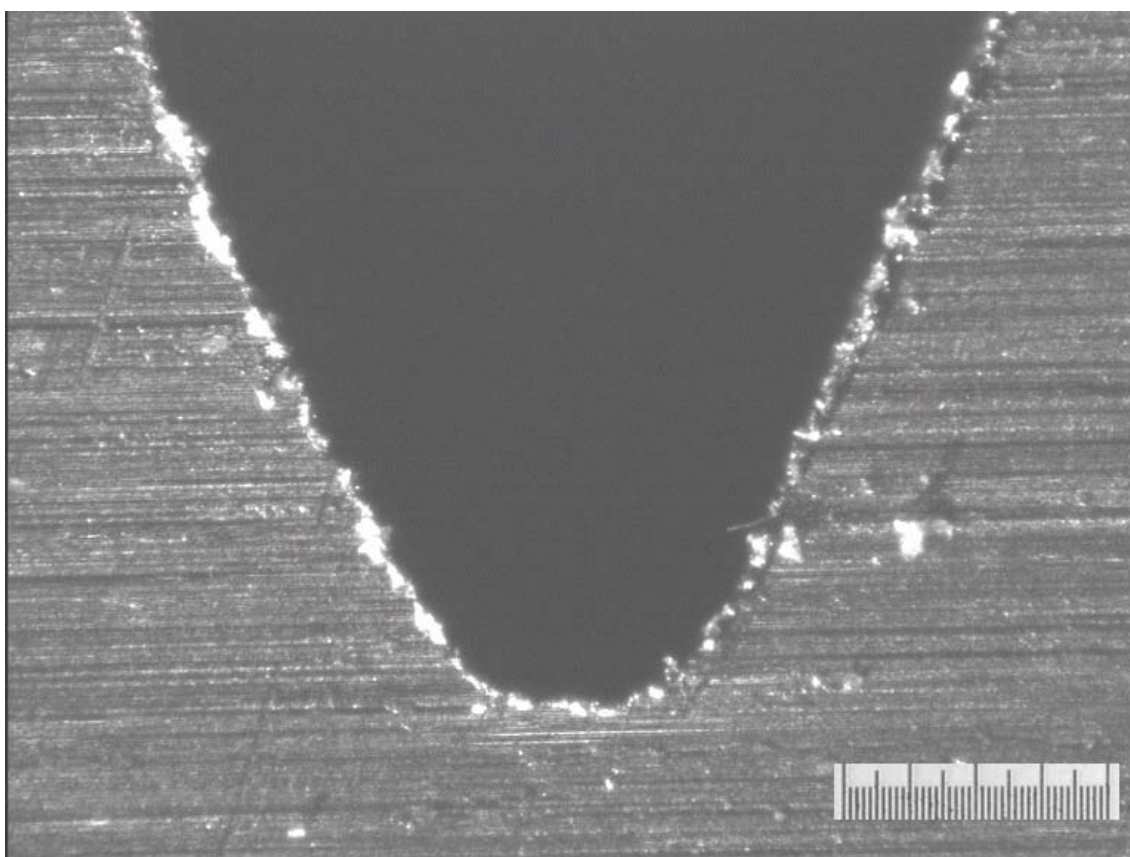
Obrázek č.16 Struktura jádra materiálu po popouštění při 390 °C 1 dílek = 0,01 mm



Obrázek č.17 Struktura jádra materiálu po popouštění při 430 °C 1 dílek = 0,01 mm

3.2 VÝROBA VZORKŮ

Vzorky byly zhotoveny ze zbytků a zmetků z výroby. Polotovarem byla tyčovina (označení: tyč D 30h9 16MnCr5+FP+SH), kde FP značí žhání na feriticko perlitickou strukturu a SH je loupáný materiál. Vzorky byly zpracovány třískovým obráběním na konzolové frézce FGS 25/32 za použití chladicí kapaliny CIMSTAR 560 o koncentraci 3 až 5 % . Pro tuto diplomovou práci bylo vyrobeno 100 vzorků pro vrubovou houževnatost. Byl zvolen vrub tvaru V kvůli vyšší citlivosti tohoto vrubu. Vrub byl vyroben na elektroerozivní drátové řezačce 254Y pod ochrannou kapalinou (destilovaná voda). Byl použit drát o průměru 0,25 mm. Prořez je 0,3 mm. Kvalita práce je vidět na obrázku č.18.



Obrázek č.18 Zobrazení paty V vrubu

1 dílek = 0,01 mm

Zhotovené vzorky byly označeny číslem od 1 do 100 a připraveny na tepelné zpracování podle následující tabulky

Číslo vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]
1 – 5	Bez tepelného zpracování	/
6 – 10	Popouštění	165
11 – 15	Popouštění	175
16 – 20	Popouštění	184
21 – 25	Popouštění	194
26 – 30	Popouštění	203
31 – 35	Popouštění	213
36, 37	Popouštění	239
38, 39	Popouštění	260
40 – 42	Popouštění	298
43 – 47	Popouštění	307
48 – 52	Popouštění	318
53 – 57	Popouštění	326
60 – 64	Popouštění	350
65	Kalení	/
66 – 70	Popouštění	360
71 – 75	Popouštění	370
76 – 80	Popouštění	380
81 – 85	Popouštění	390
86 – 90	Popouštění	430
91 – 95	Popouštění	476
96 – 100	Popouštění	410

3.3 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ

3.3.1 Pecní zařízení

Chemicko-tepelné zpracování proběhlo v peci CODERE. Jde o zařízení s patentovaným posuvným systémem ke kalení vsazky.

CODERE 250-42/60

Typ H1-C11-E-Cr-LA2-MM, s elektrickým vytápěním

V tomto zařízení je možné provádět tyto operace:

- zušlechťování a nitrocementace s následným v oleji nebo ve vodě,
- předeheřev, popouštění, žihání a ochlazování s nebo bez ochranné atmosféry a dvoustupňové praní.

Díky pojezdové peci má systém následující výhodu:

- při přenosu vsazky mezi pecí a kalicí lázní nedochází ke ztrátám teploty.

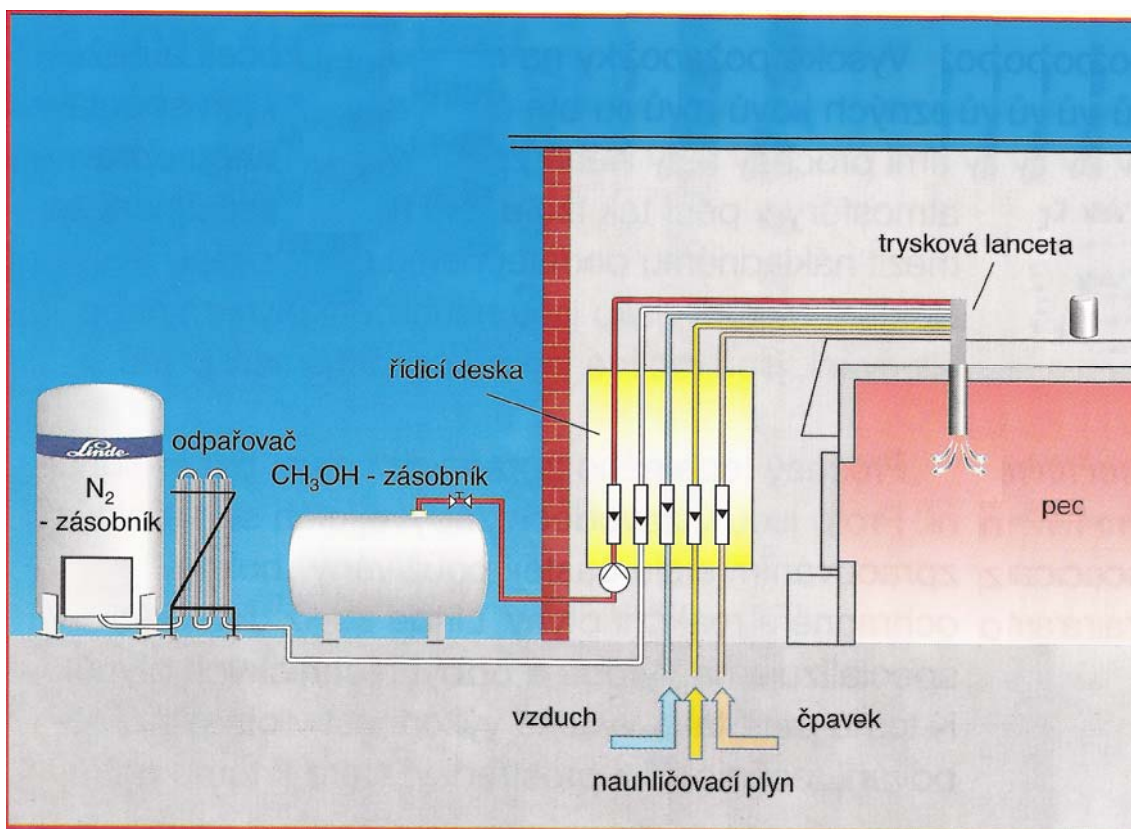
Tepelné parametry zařízení:

- kalicí pec pracuje do teploty 1100 °C,
- maximální teplota popouštění je 650 °C.

Pec CODERE pro chemicko-tepelné zpracování ve firmě Narex, a.s. Česká Lípa se skládá z těchto částí:

- 1) kalicí a cementační pec** - zde dochází k ohřevu součástí pro kalení a cementaci pod ochrannou atmosférou,
- 2) popouštěcí pec** - slouží k ohřevu součástí pro žihání, popouštění,
- 3) kalicí lázeň** - zde dochází k zakalení součástí v olejové lázni po austenitizaci v peci,
- 4) pračka** - slouží k odmašťování a alkalickému praní vsázek před tepelném zpracování a po něm a po sušení horkým vzduchem,
- 5) manipulátor** - pro převoz vsázek mezi jednotlivými moduly. /12/

Pec je řízena softwarem CARBOMANAGEMENT, který ovládá přívod pracovních plynů a zároveň ukládá informace o složení vsázek i o jejich tepelném zpracování.



CARBOTHAN® - schéma zásobování

Obrázek č.19 Princip zásobování pece pracovními plyny

/13/

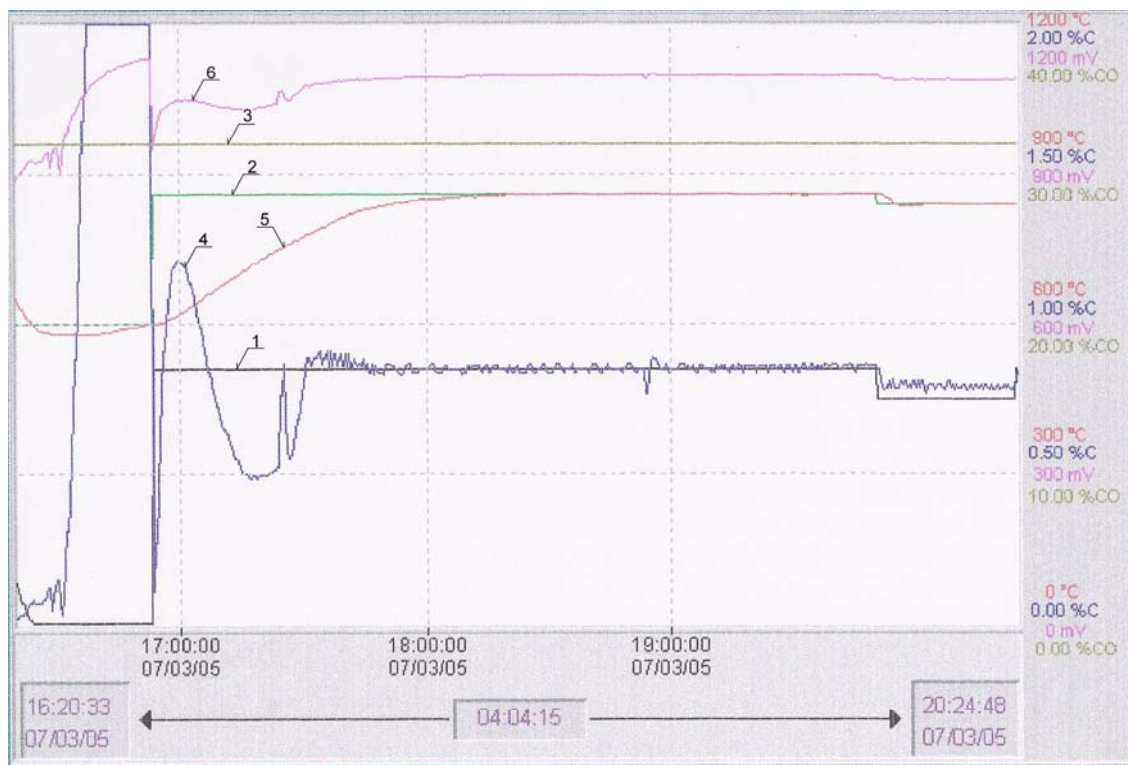
3.3.2 Popis procesu NC0,3-0,5+PO

Po vložení vsázky do pece dojde k mírnému ochlazení vnitřní části pece v důsledku vložení studené vsázky. Po uzavření dochází k předehřevu po dobu 30 minut při teplotě 600 °C. Během této doby proudí do pecního prostoru N₂, který chrání vsázku před oxidací a zároveň chrání pec před výbuchem, jenž by mohl nastat při reakci $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}$. Tato reakce proběhne při teplotě okolo 750 °C. Připouštění N₂ probíhá automaticky pouze od uzavření pece do teploty 750 °C. Nad teplotou vyšší než 750 °C je CO již stabilní a nehrozí výbuch.

V dalším kroku dochází k nitrocementaci při teplotě 860 °C po dobu 1:51 hod. Během této doby je do pecního prostoru přiváděn čpavek (36 l/hod) a štěpený metanol + zemní plyn. Zemní plyn je přiváděn automaticky pouze v případě nedostatku CO. Čpavek se rozkládá $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$. Uhlíkový potenciál je $c_p=0,85$.

V třetím kroku je teplota snížena na teplotu kalení 840 °C na dobu 30 minut z důvodu prohřátí vsázky. Uhlíkový potenciál je $c_p=0,75$.

V posledním kroku se vsázka přesune nad kalici modul a zakalí se do oleje. Míchání oleje je opožděno cca o 5 sekund, kvůli rovnoměrnějšímu zchladnutí povrchu, jinak hrozí nebezpečí vzniku velkého pnutí. Pokud olej při míchání narazí na jednu stranu součásti, ochladí ji rychleji než zbytek, vzniklý martenzit způsobí pnutí a hrozí deformace. Opožděné míchání se používá hlavně u delších tenkých hřídelů.



Graf č.1 Průběh nitrocementace

- 1 - uhlíkový potenciál nastavený programem
- 2 - nastavení teploty v peci podle programu
- 3 - napětí na kyslíkové sondě při průtoku vzduchu (bez pracovní atmosféry)
- 4 - skutečný průběh uhlíkového potenciálu během procesu
- 5 - skutečný průběh teploty během procesu
- 6 - napětí na kyslíkové sondě, které je závislé na pracovní atmosféře v peci

Kompletní protokol je v příloze č. 4.

3.4 VÝSLEDKY ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

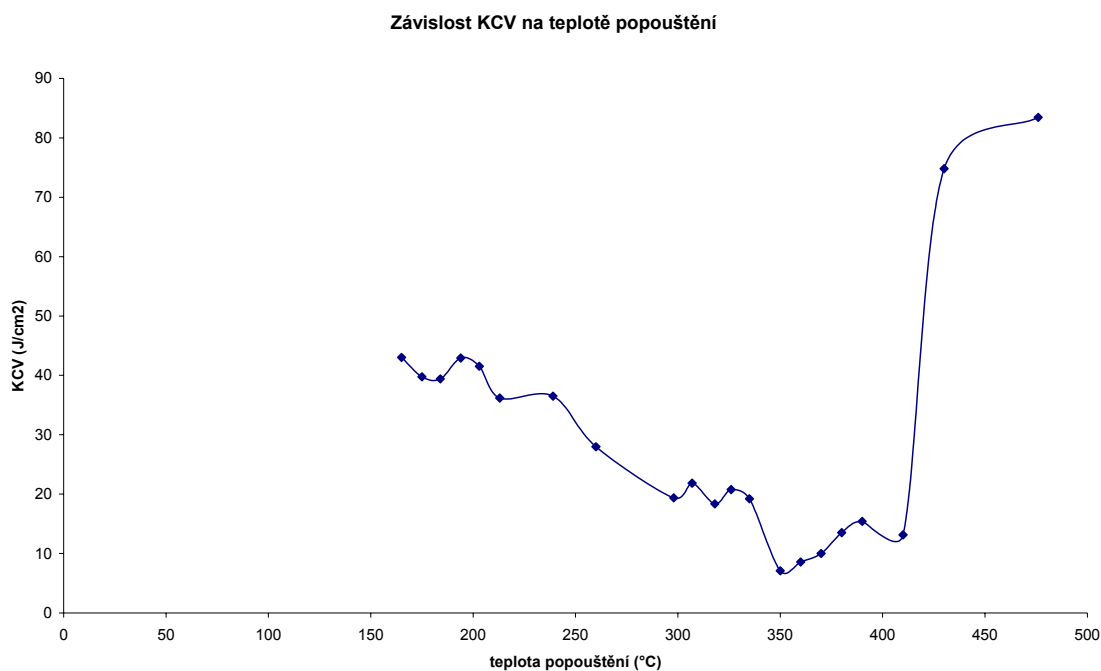
Hlavním cílem diplomové práce bylo určení teplotního intervalu popouštěcí křehkosti u materiálu 16MnCr5, zvolena byla vrubová zkouška podle Charpyho, protože je dostupnější a obvyklejší.

Zkouška proběhla v laboratořích Střední průmyslové školy v České Lípě na stroji WPM. Podmínky při průběhu zkoušky byly teplota byla 23 °C a tlak byl 74,8 kPa.

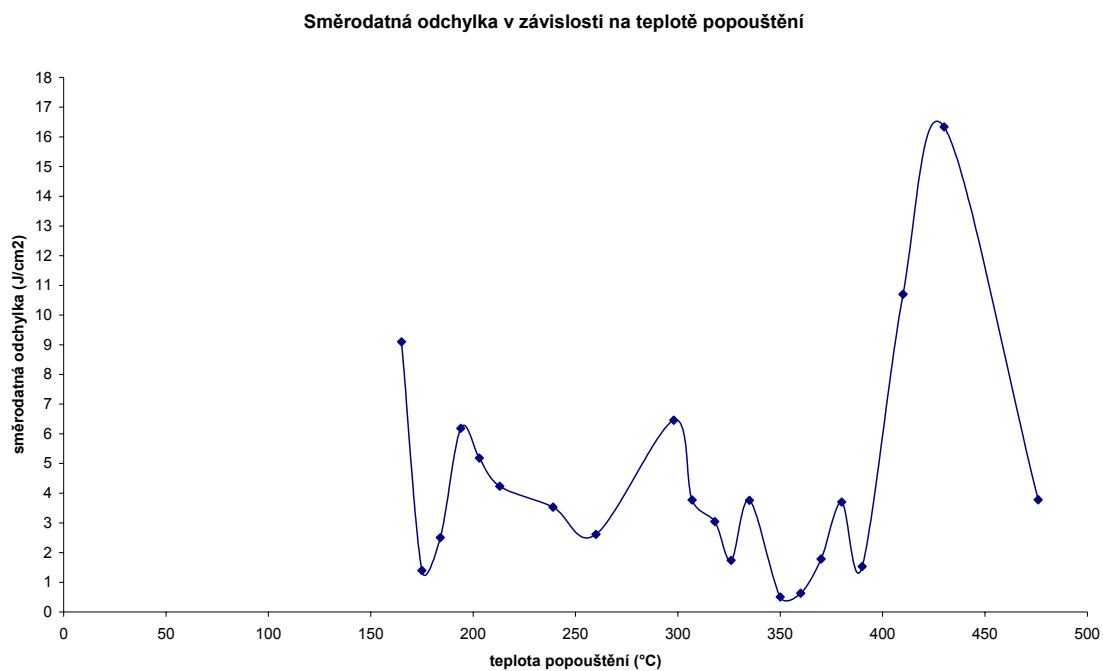
Vzorky byly vkládány do pracovního prostoru stroje a přeráženy. Naměřené hodnoty byly zaznamenávány do tabulky.

Dále byla změřena hodnota vrubové houževnatosti u základního materiálu bez tepelného zpracování, která je 61,6 J/cm². Změřena byla tvrdost i u vzorku, který byl pouze zakalen bez následného popuštění. Hodnota houževnatosti je 31 J/cm².

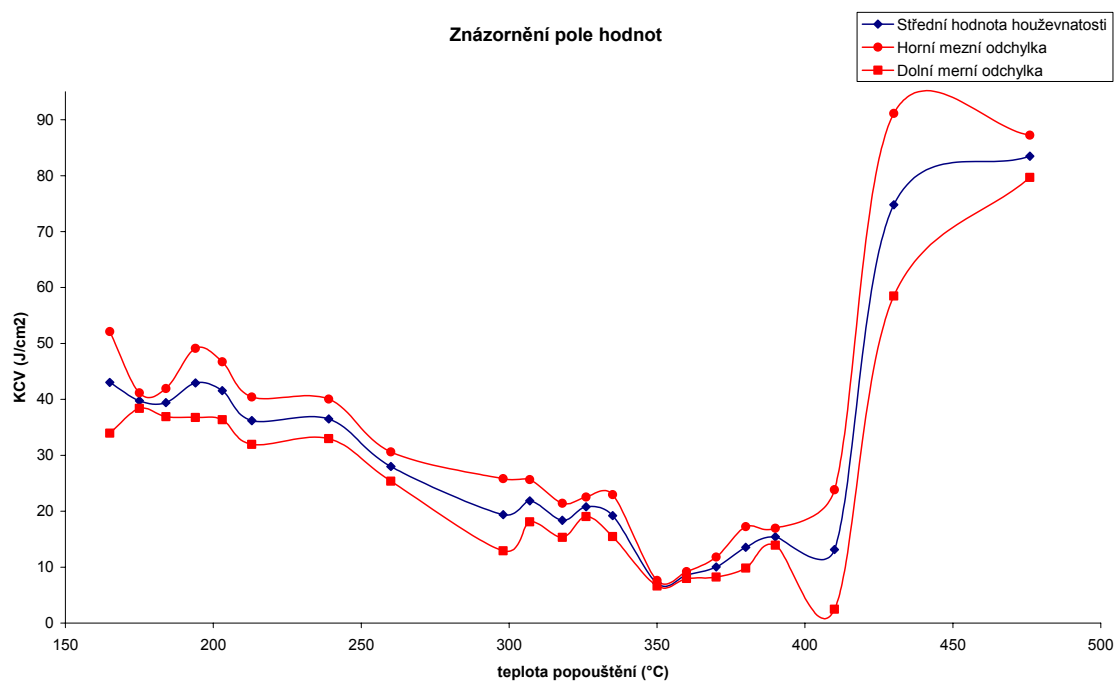
Hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze č.5. V grafu č.4 je znázorněn průběh průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na popouštěcí teplotě. Z naměřených hodnot byla dále vypočtena směrodatná odchylka. Graf č.5 znázorňuje směrodatnou odchylku v závislosti na teplotě popuštění. Graf č.6 je kombinací grafu č.4 a grafu č.5 a znázorňuje pole pravděpodobných hodnot vrubové houževnatosti v závislosti na popouštěcí teplotě. Hodnoty jsou uvedeny v příloze č.5.



Graf č.4 Průběh průměrné hodnoty vrubové houževnatosti v závislosti na popouštěcí teplotě



Graf č.5 Průběh směrodatné odchylky v závislosti na popouštěcí teplotě



Graf č.6 Znázornění pole pravděpodobných hodnot vrubové houževnatosti v závislosti na popouštěcí teplotě

3.5 ZKOUŠKA TVRDOSTI

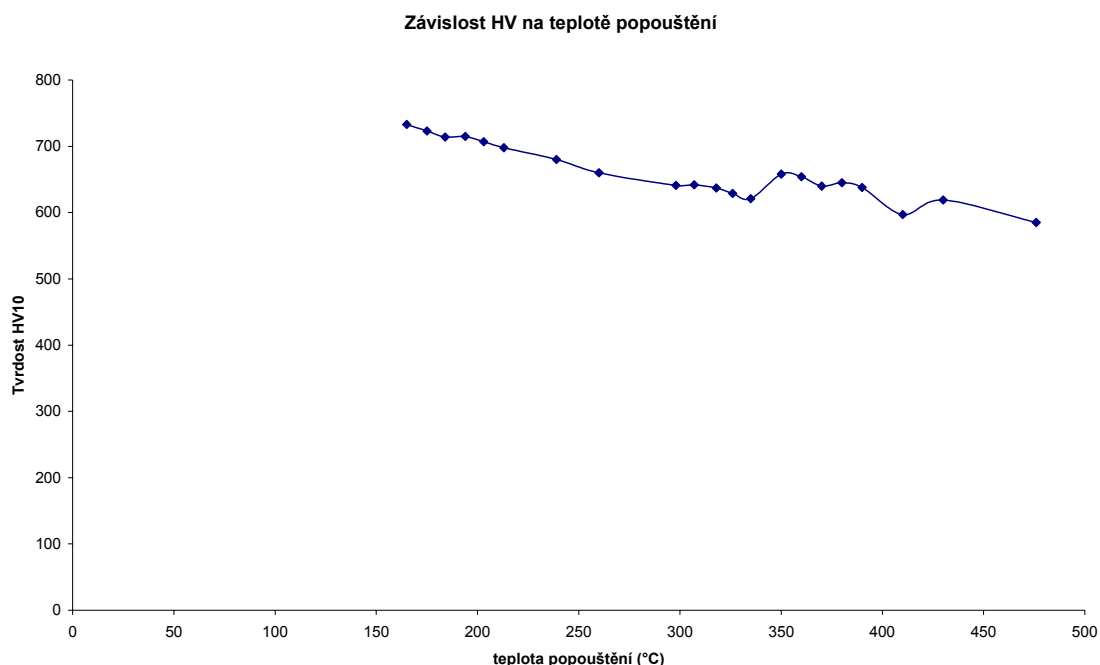
Pro zjištění tvrdosti byla zvolena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Při této zkoušce se vtlačuje do materiálu diamantový jehlan, proto je vhodná k určování tvrdosti kalených povrchů.

Po tepelném zpracování se u každého vzorku provedly 3 vtisky do předem upraveného místa. Místo bylo přebroušeno kvůli čitelnosti vtisku. Umístění bylo vybíráno tak, aby nedošlo k žádnému ovlivnění míst v okolí vrubu. Vtisky byly zhotoveny a změřeny na stroji INSTRON WOLPERT zatížením HV10. Označení HV10 je pro zatížení 98,07 N po dobu 10 s. Hodnoty byly automaticky zaznamenávány do protokolu programu, kterým byl tvrdoměr vybaven.

Tvrdost byla měřena pro účely vývojového oddělení společnosti Narex, a.s. Česká Lípa. Na výkres se zapisuje hodnota tvrdosti. Podle této hodnoty se určuje teplota popouštění.

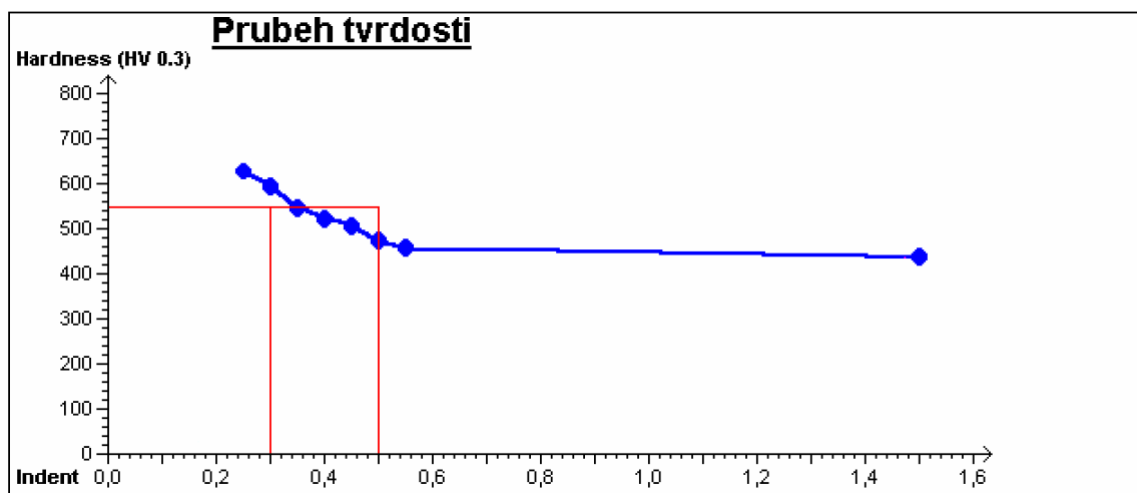
Byla změřena hodnota tvrdosti u základního materiálu bez tepelného zpracování, která je 164 HV10. Dále byla změřena tvrdost u vzorku, který byl pouze zakalen bez následného popouštění. Hodnota tvrdosti je 860 HV10.

Hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze č.5. V grafu č.2 je znázorněn průběh průměrné hodnoty tvrdosti v závislosti na popouštěcí teplotě.

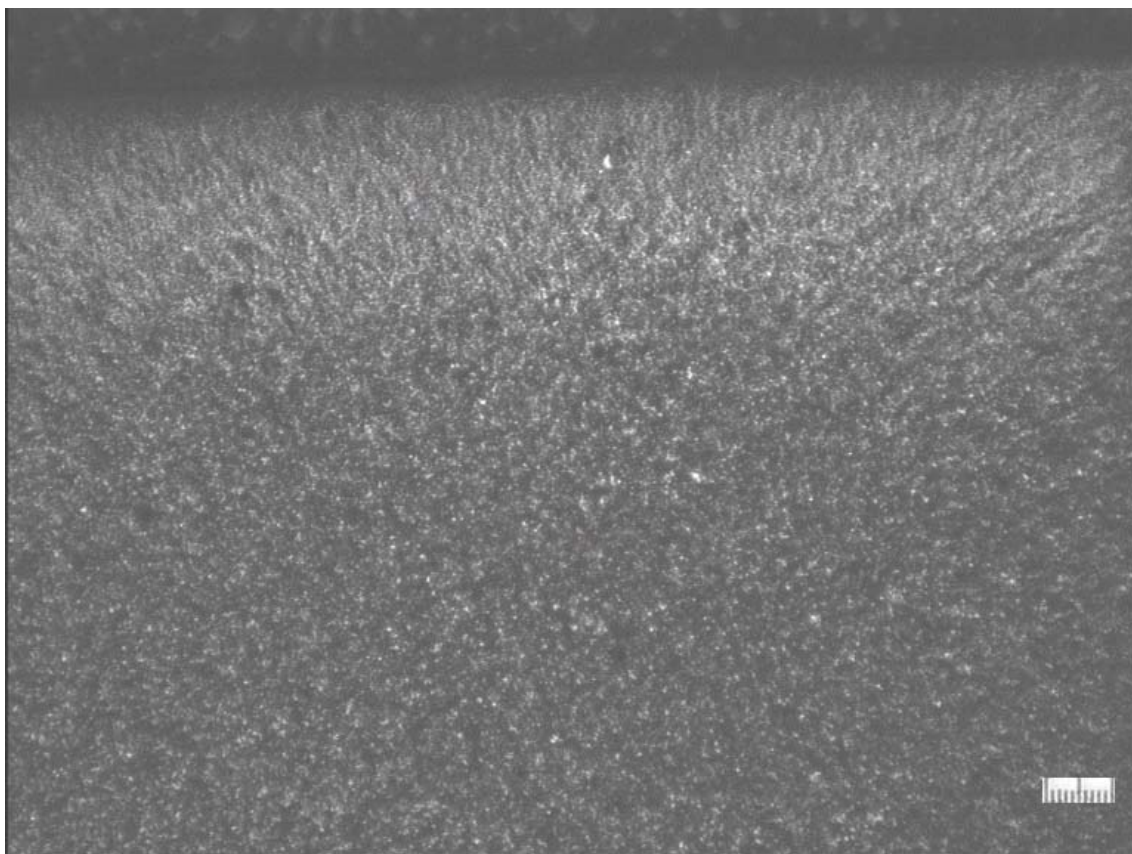


Graf č.2 Závislost tvrdosti na teplotě popouštění

Dále byla změřena tloušťka nitrocementované vrstvy pomocí mikrotvrdosti, která byla měřena pomocí přístroje Mikrotvrdoměr AMH 2000 Leco. Vyhodnocení proběhlo v programu Hard Test. Bylo použito zatížení 300g. V grafu č.3 je znázorněn průběh tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Svislé červené čáry ohraničují očekávanou oblast smluvní hloubky a vodorovná čára určuje smluvní tvrdost 550 HV. Výsledná smluvní hloubka vrstvy je v místě průsečíku grafu a smluvní tvrdosti. Smluvní hloubka nitrocementované vrstvy vyšla $Eht\ 550HV_{0,3} = 0,35\text{ mm}$. Protokol je v příloze č.6.



Graf č.3 Průběh tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Obrázek č.20 Nitrocementovaná vrstva

1 dílek = 0,01 mm

Na obrázku č. 20 je struktura vrstvy. Vrstva se ukazuje jako světlý pruh.

3.6 VÝSLEDKY KAVALERIHO METODY A METODY “KŘÍŽE”

Tato metoda slouží jako kontrolní metoda při určování poměru vizuálně houževnatého a vizuálně křehkého lomu na lomové ploše.

Jelikož nebylo možno pořídit kompletní detailní snímek povrchu, kde by bylo možno rozpoznat místa křehkého porušení v oblastech houževnatého porušení, není možno určit poměr mezi houževnatým a křehkým lomem na lomové ploše zcela přesně.

Protože k záznamu povrchu lomu byl použit digitální fotoaparát NIKON s nižším stupněm rozlišení než má například elektronový mikroskop, je možné na snímcích rozpoznat křehký lom pouze na okrajích lomové plochy. Tento lom se pomalu vytrácí s rostoucí vzdáleností od povrchu, což je způsobeno ubýváním uhlíku a dusíku ve směru do jádra vzorku. Vizuálně křehký lom je v celé oblasti lomu, jak je vidět na snímcích č. 21 až 24. Tyto snímky byly použity k vyhodnocení.

U Kavalieriho metody byl použit rastr $r = 2,2$ cm a odečteny tyto výsledky

Číslo vzorku	Teplota popouštění [°C]	Procento vizuálně křehkého lomu [%]
1	213	86,86
2	239	88,83
3	390	90,14
4	430	86,58

Tabulka č.1

U metody kříže byl použit kříž se 4 osami a naměřeny hodnoty

Číslo vzorku	Teplota popouštění [°C]	Procento vizuálně křehkého lomu [%]
1	213	83,10
2	239	81,19
3	390	76,14
4	430	52,02

Tabulka č.2

Tabulka měření je v příloze č.7.

Pro ukázkou byl pořízen snímek z elektronového mikroskopu lomu v oblasti nitrocementované vrstvy a snímek oblasti převážně houževnatého lomu. Obrázek č. 25 zobrazuje křehký interkrystalický lom v oblasti vrstvy. Na obrázku č. 26 je houževnatý lom v oblasti jádra. Jak je vidět na obrázku č. 26, houževnatý lom je s místy, ve kterých je lom křehký. To je příklad, kvůli kterému není možné určit poměr lomů přesně, protože na fotografiích celé lomové plochy není možno rozeznat křehký lom v lomu houževnatém.



Obrázek č.21 Lomová plocha vzorku popouštěného při teplotě 213 °C



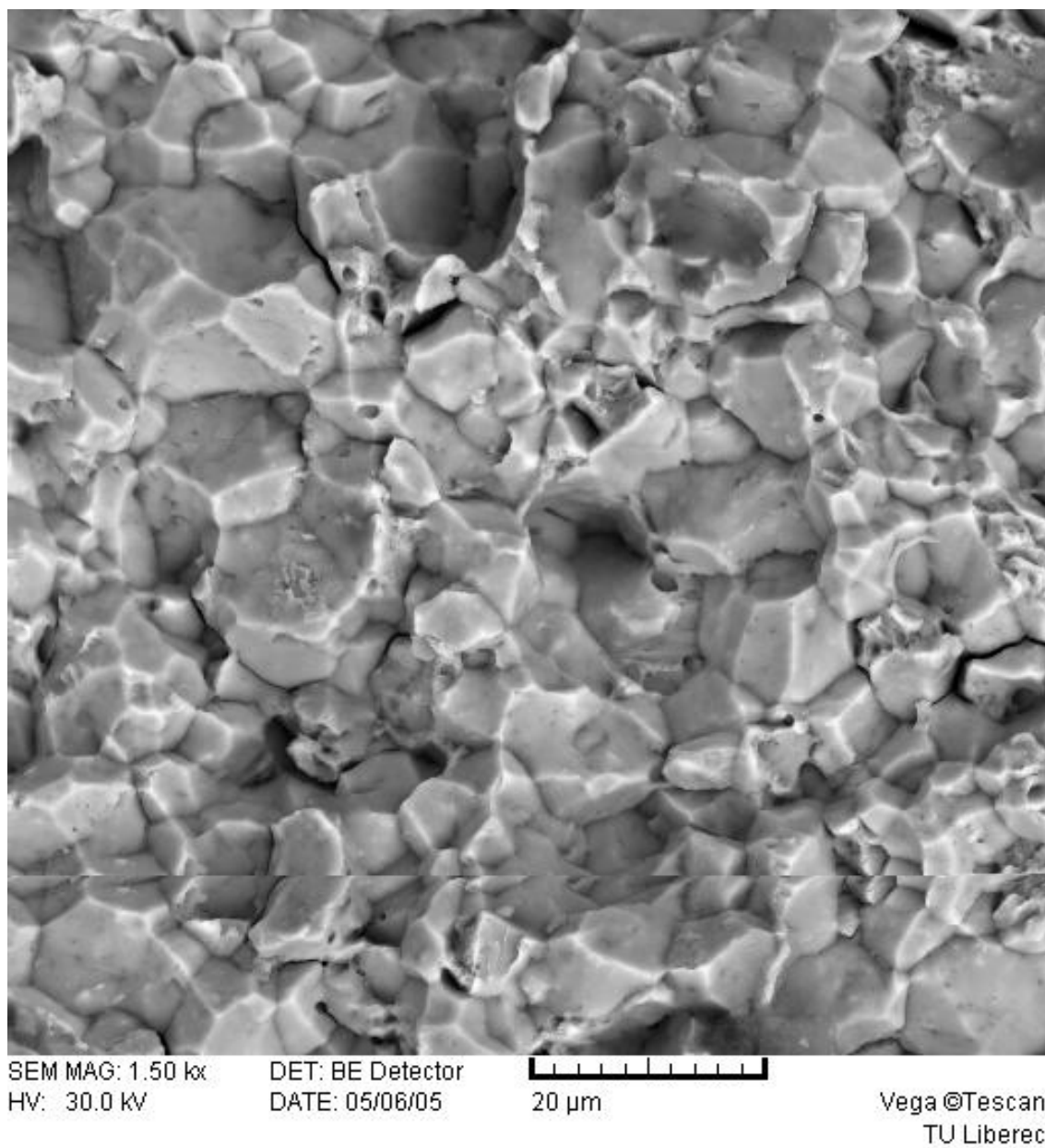
Obrázek č.22 Lomová plocha vzorku popouštěného při teplotě 239 °C



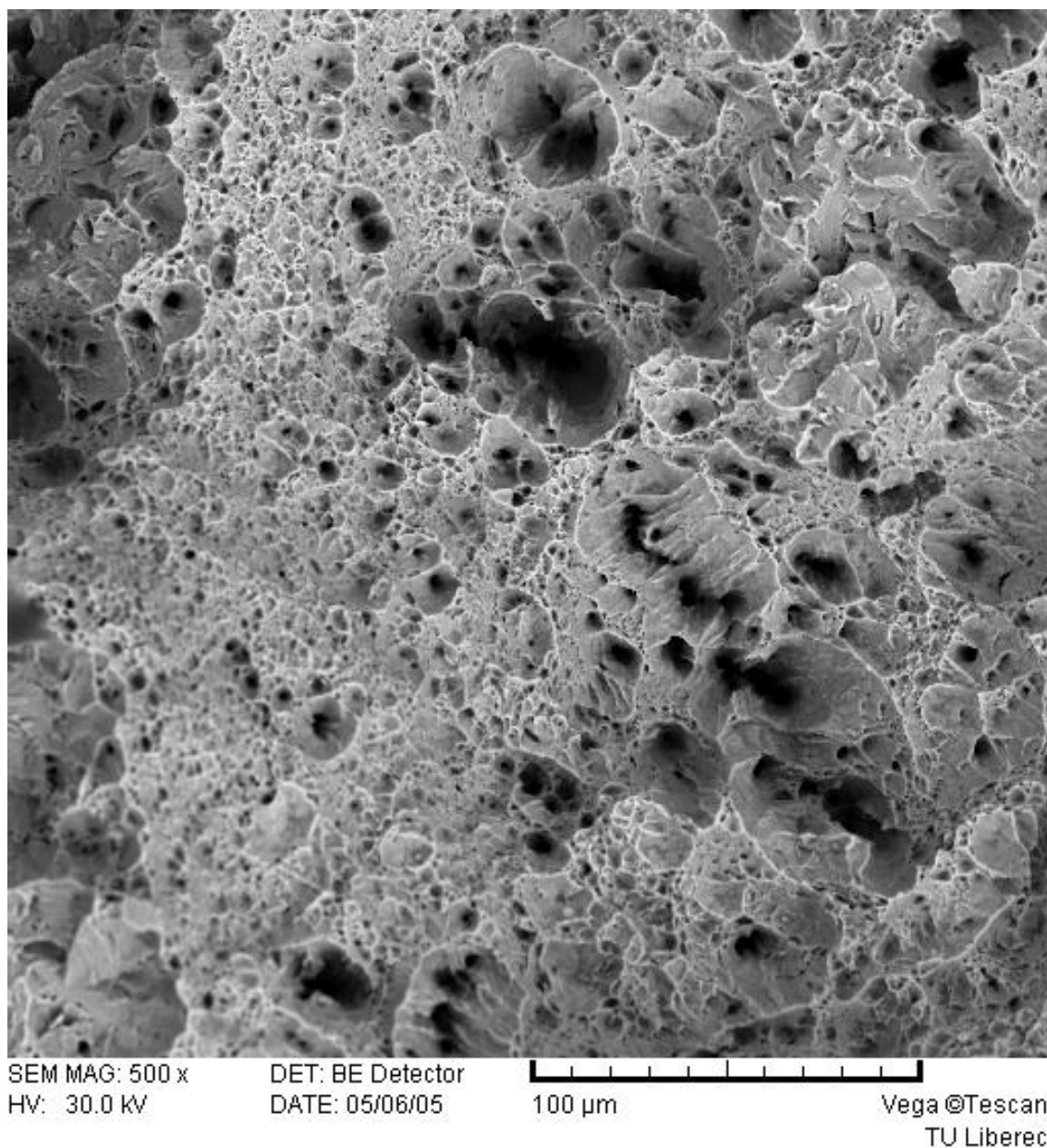
Obrázek č.23 Lomová plocha vzorku popouštěného při teplotě 390 °C



Obrázek č.24 Lomová plocha vzorku popouštěného při teplotě 430 °C



Obrázek č.25 Lomová plocha v oblasti nitrocementované vrstvy



Obrázek č.26 Lomová plocha v oblasti jádra

Na obrázku č.26 je lomová plocha oblasti jádra. V levém spodním rohu je oblast lomu křehkého. Houževnatý lom začíná v místech vměstku.

3.7 SHRnutí VÝSLEDKŮ

Dodaný materiál v základním stavu vykazuje velmi vysoký stupeň řádkovitosti, což má vliv na jeho obrobiteľnosť.

Materiál je vhodný pro nitrocementace díky svému složení. Zvolený program nitrocementace NC0,3-0,5+PO je vyhovující. Vzniklá nitrocementační vrstva je dostatečná a plní dobře svou funkci.

Při této diplomové práci byly využity výrobní kapacity podniku Narex, a.s. a možnosti poskytnuté Střední průmyslovou školou v České Lípě.

Přesnost výroby vrubu je omezena přesností použitého zařízení. Udaná přesnost je 0,01 mm. Kontrolním měřením na 10 vzorcích bylo zjištěno, že úhel vrubu není přesně $45^\circ \pm 2^\circ$, ale pohybuje se v rozmezí 39,5 až 52,3 ° (příloha č.8). Pata vrubu má mít poloměr 0,25 mm. Kontrolně bylo změřeno 10 vzorků a poloměr se pohybuje v rozmezí 0,14 až 0,27 mm (příloha č.8). Tyto nedostatky byly zčásti odstraněny tím, že se popouštělo více vrubových tělísek na jednu popouštěcí teplotu a výsledná průměrná hodnota byla vynesena do grafu. Z těchto hodnot byla dále vypočtena směrodatná odchylka, která určuje pole pravděpodobných hodnot houževnatosti u jednotlivých teplot.

Měření houževnatost probíhalo s určitými potížemi, které mohou mít jistý vliv na výsledek. U některých vzorků se i po veškerém seřizování nepovedlo provést zkoušku zcela korektně, protože hrana kladiva nedopadla přesně proti vrubu.

Jak je vidět v grafu vrubové houževnatosti (graf č.4), houževnatost začíná pozvolna klesat od teploty popouštění 165 °C, kdy byla naměřena houževnatost 43,03 J/cm². Pokles je pozvolný do popouštěcí teploty 350 °C, kdy bylo dosaženo nejnižší houževnatosti 7,1 J/cm². Od teploty 350 °C začíná houževnatost opět mírně narůstat až do popouštěcí teploty 410 °C a hodnoty houževnatosti 13,1 J/cm². Při teplotě 430 °C je naměřena houževnatost 74,79 J/cm², což se dá již považovat za dostatečnou houževnatost na to, aby součásti vydržely namáhání. V rozmezí teplot 165 až 260 °C je dolní hranice popouštěcí křehkosti a mezi teplotami 410 a 430 °C leží horní hranice popouštěcí křehkosti.

S ohledem pouze na houževnatost je možné materiál popouštět na teploty od 165 až 240 °C a nebo na teplotu 430 °C, kde je vrubová houževnatost dostatečná. Dále by se dal použít i samotný materiál bez tepelného zpracování.

Naměřené hodnoty tvrdosti byly využity pro určení průměrné hodnoty pro příslušnou teplotu. Směrodatná odchylka nebyla počítána současně. Její hodnota není určena, neboť byl původní software nahrazen programem KB Hard Win, který je lepší a lépe se s ním pracuje. Bohužel tento program neumí zpracovat soubory pořízené původním softwarem. Není možnost dostat se k hodnotám.

Graf tvrdosti v závislosti na teplotě popouštění má pozvolna klesající charakter s rostoucí teplotou popouštění. Tvrdost se pohybuje od 733 HV při teplotě 165 °C až do 585 HV při teplotě 476 °C.

Pokud vezmeme v úvahu jen tvrdost povrchové vrstvy, nejvyšší tvrdost byla naměřena u zakaleného nepopouštěného vzorku. S rostoucí teplotou popouštění tvrdost vrstvy klesá.

Hloubka vrstvy byla změřena pomocí mikrotvrdosti. Interval, ve kterém se má smluvní hloubka pohybovat, je 0,3 až 0,5 mm. Byla naměřena hloubka 0,35 mm, což je v požadovaném intervalu.

Zpracování lomových ploch metodami podle Kavaleriho a metodou “kříže” bylo provedeno za účelem ověření těchto metod jako alternativních způsobů určování houževnatosti.

Vycházíme z předpokladu, že pokud je lom křehký, bude se jevit křehce i vizuálně a stejně to platí i lomu houževnatého. Jak je vidět v tabulkách č.1 a 2, jako lepší se jeví metoda podle Kavaleriho, jelikož vypočtené procento vizuálně křehkého lomu korespondovalo s celkovým dojmem z obrazu. Výsledky metody “kříže” jsou odlišné, ale více odpovídají naměřeným hodnotám vrubové houževnatosti. Zde se výše uvedený předpoklad nepotvrdil.

4. Závěr

1. Úkolem bylo navrhnout a provést experiment k určení vrubové houževnatosti. Jak je uvedeno výše, byla zvolena zkouška podle Charpyho, protože je obvyklejší a dostupnější. Výsledky experimentu jsou uvedeny výše v grafech a dále i v příloze č.5.

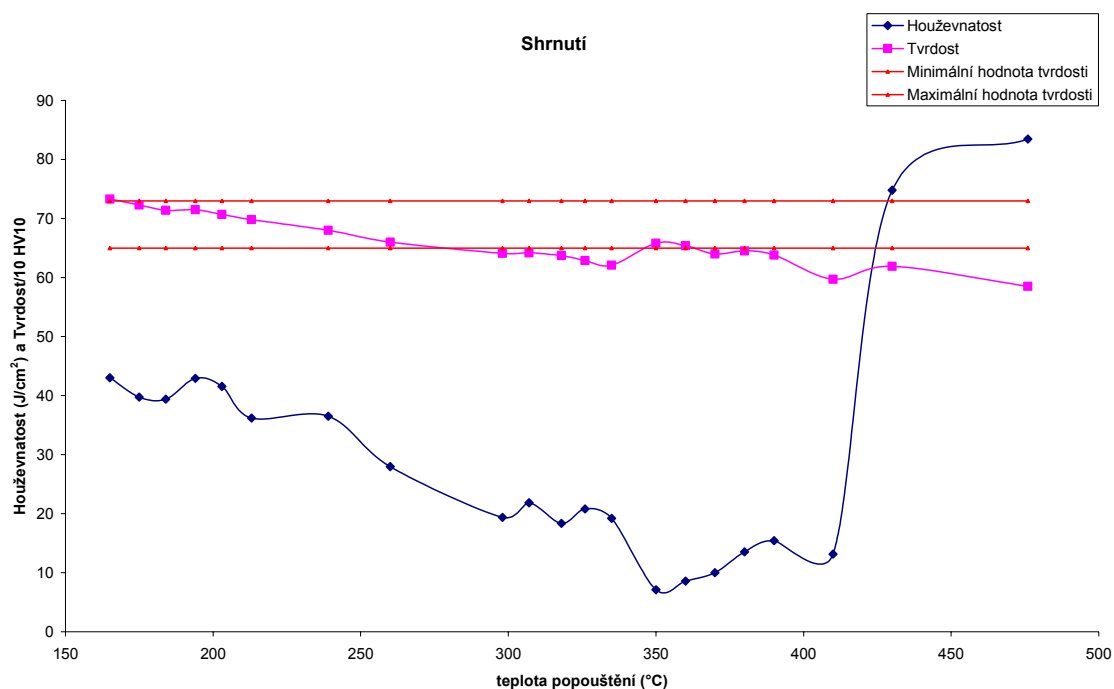
2. Dalším úkolem bylo stanovit interval popouštěcí křehkosti.

Nejprve je nutné určit hranici vrubové houževnatosti, od které budeme materiál považovat za křehký. V našem případě je hodnotu stanovena materiálovým listem na 30 J/cm^2 . Teplotní interval popouštěcí křehkosti je tedy od 260 do $410 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Posledním úkolem bylo optimalizovat chemicko-tepelné zpracování s ohledem na požadované vlastnosti, a to hlavně na tvrdost a hloubku vrstvy.

Pokud jde o hloubku vrstvy, doporučuji prodloužit délku nitrocementačního procesu o 5 minut na základě zkušeností inženýra Vlasáka a na podkladě dosaženého výsledku $0,35 \text{ mm}$, což je na dolním okraji požadovaného intervalu $0,3$ až $0,5 \text{ mm}$.

Požadavek na tvrdost povrchové vrstvy je 650 až 730 HV kvůli lepší zabíravosti ozubených kol. Tuto podmínku splňují vzorky popouštěné v teplotním intervalu 175 až $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota $260 \text{ }^\circ\text{C}$ je ovšem také zároveň hraniční teplotou popouštěcí křehkosti. Všechny tyto údaje jsou patrné i z grafu č.7. Doporučuji proto popouštění v intervalu od 190 do $250 \text{ }^\circ\text{C}$ s přihlédnutím k požadovanému intervalu tvrdosti.



Graf č.7 Shrnutí dosažených výsledků

5. Použitá literatura

- /1/ PÍŠEK,F., JENÍČEK,L., RYŠ,P.: Nauka o materiálu I, Praha NČAV, 1975
- /2/ BENEŠ,A. a kol.: Kovové materiály vlastnosti a použití, technický průvodce 47, Praha, SNTL, 1968
- /3/ PŘENOSIL,B.: Nitrocementace, Praha, SNTL 1964
- /4/ Kalivoda,A.: Popouštěcí křehkost ocelí, Praha, Výzkumný ústav hutnictví železa, 1971
- /5/ Jareš,V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie, Academia Praha, 1966
- /6/ Pluhař,J.: Strojírenské materiály, SNTL a ALFA, 1977
- /7/ ČSN EN 10045-1
- /8/ Veles,P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, Praha a Bratislava, SNTL s ALFA, 1985
- /9/ POKLUDA,J.:Rychlé metodiky pro stanovení mechanických charakteristik, Brno, Vysoké učení technické v Brně, 1990
- /10/ Hrubý, V., Holemář, A.: Iontová nitridace v praxi, Praha, SNTL,1989
- /11/ Moravec, O., Baborovský, V.: Nástrojové materiály a tepelné zpracování nástrojů, Praha, SNTL,1975
- /12/ Provozní podklady pece CODERE
- /13/ Propagační materiály firmy Linde

Seznam příloh

Příloha č.1 - Obrazce používané v metodě “kříže“

Příloha č.2 - Atest firmy HES

Příloha č.3 - IRA diagram oceli ČSN 41 4220 a materiálový list oceli 16MnCr5

Příloha č.4 - Průběh programu NC0,3-0,5+PO

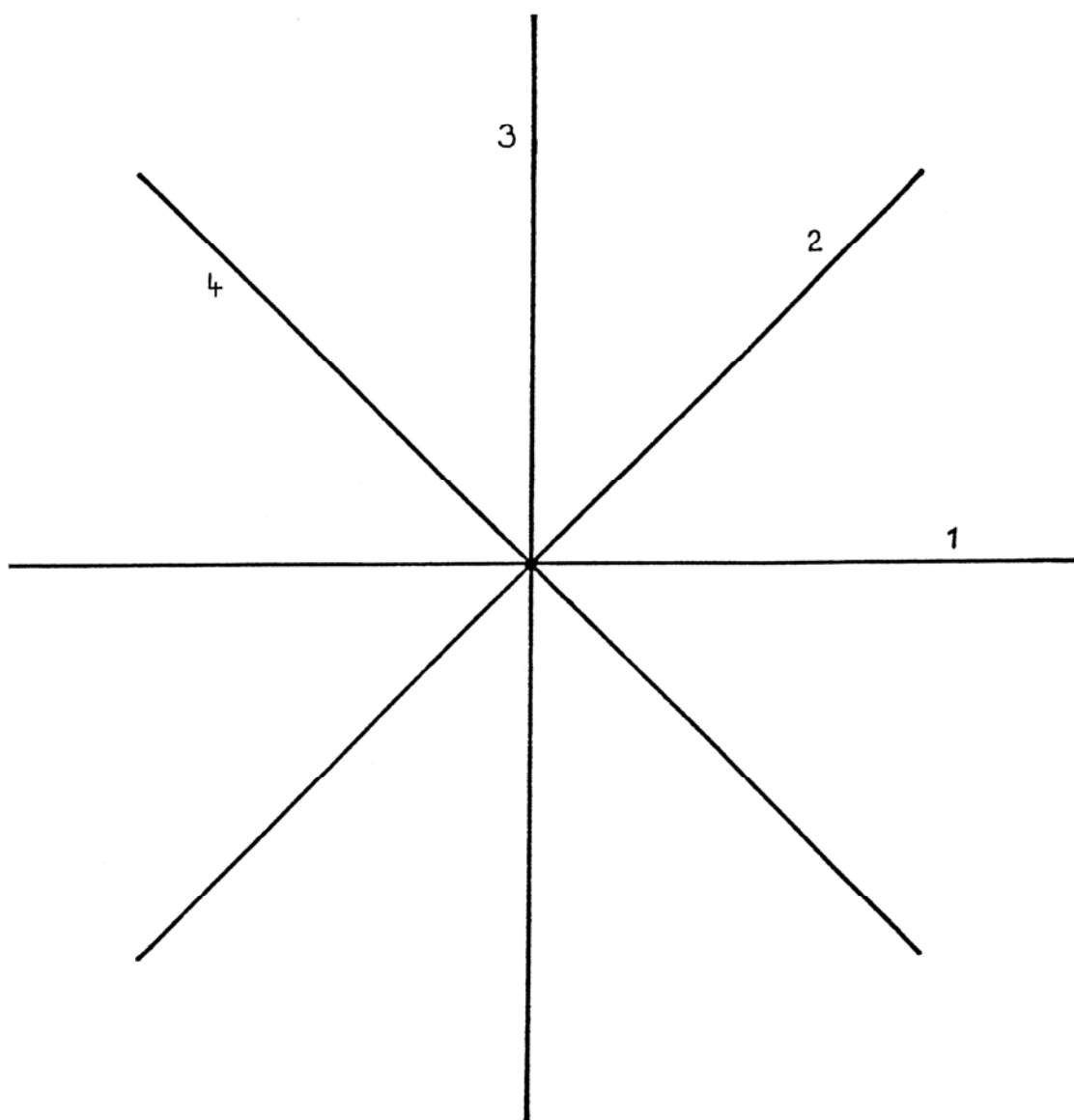
Příloha č.5 - Tabulky naměřených hodnot tvrdosti a houževnatosti

Příloha č.6 - Průběh tvrdosti vrstvy

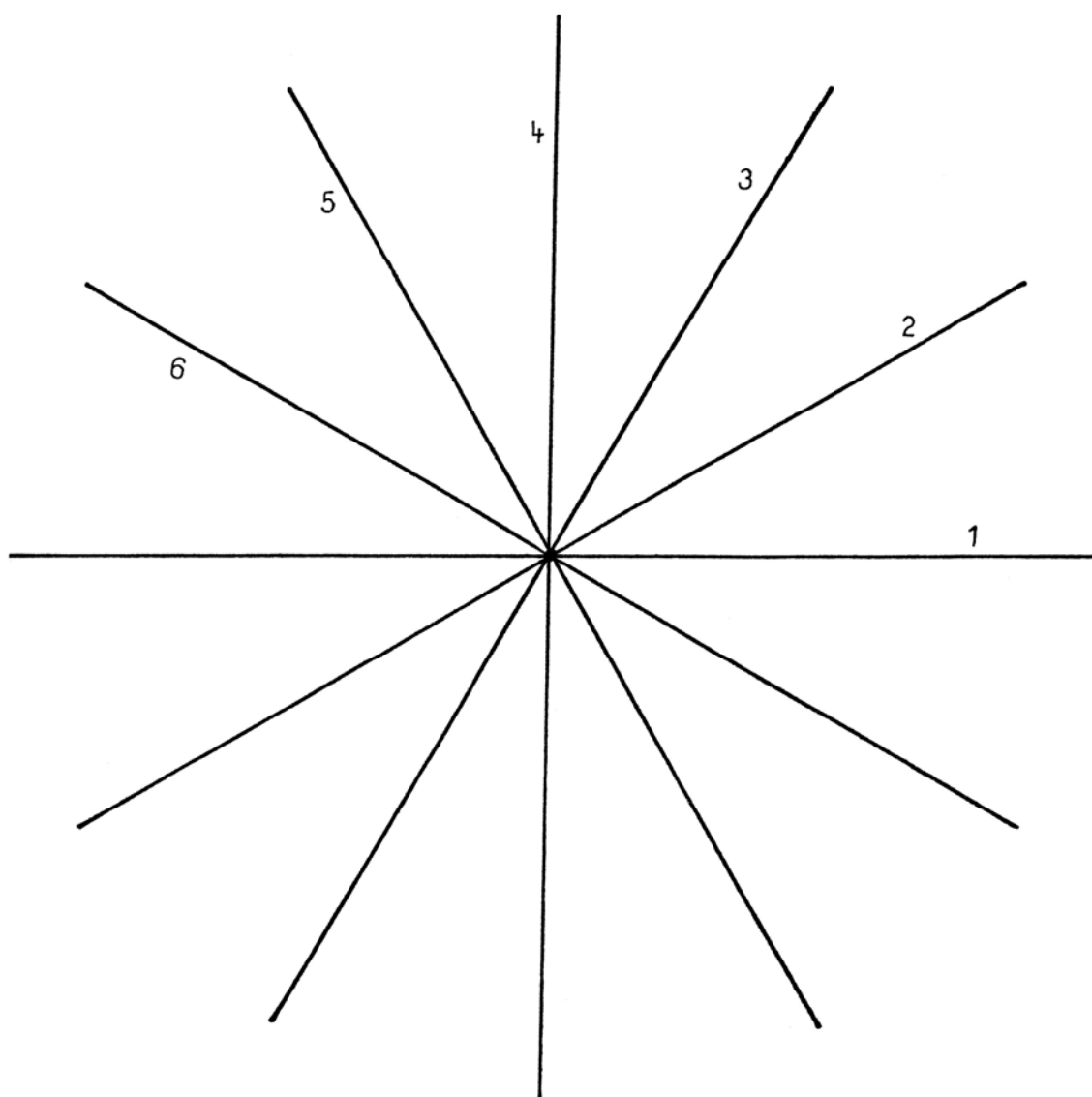
Příloha č.7 - Tabulky naměřených hodnot Kavalieriho metody a metody kříže

Příloha č.8 - Hodnoty změřených vrubů

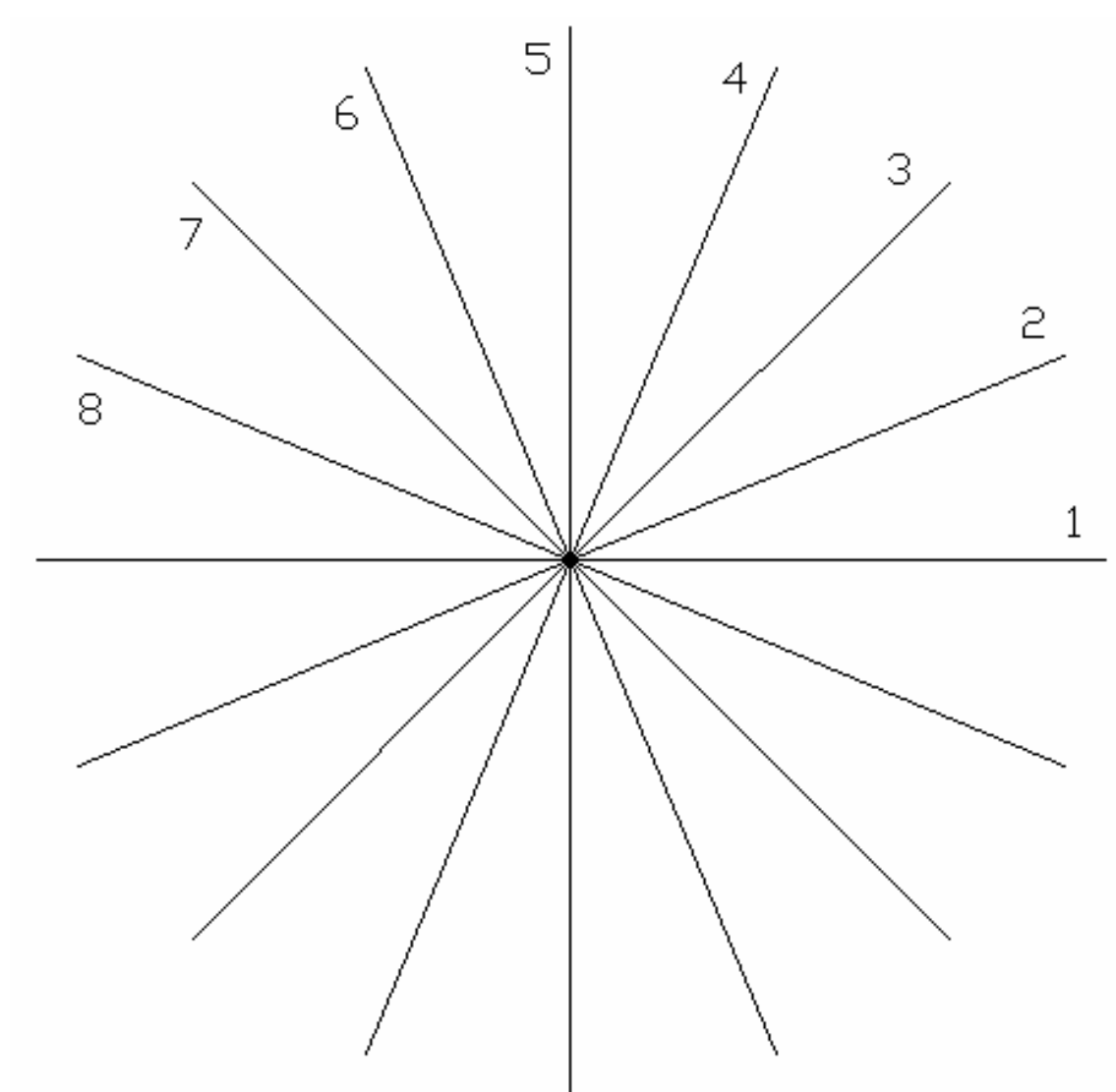
Příloha č. 1



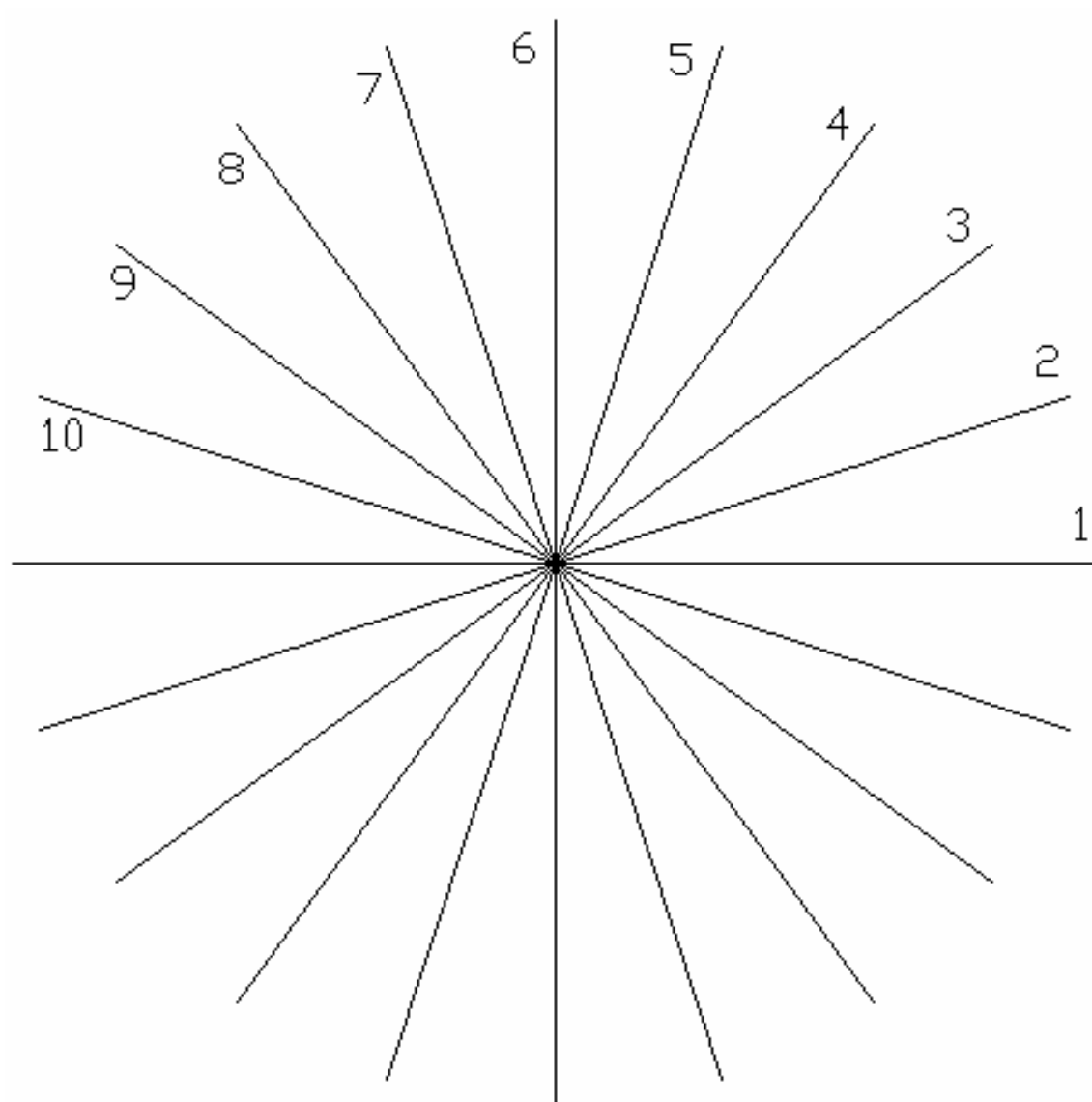
Kříž se 4 osami



Kříž se 6 osami



Kříž s 8 osami



Kříž s 10 osami

Příloha č. 2



HENNIGSDORFER ELEKTROSTAHLWERKE GMBH
Wolfgang-Küntscher-Straße 18
D-16761 HENNIGSDORF



PRÜFBESCHEINIGUNG
INSPECTION DOCUMENT
CERTIFICAT DE CONTROLE
nach/by/selon 2.2

N.° 22279 HL

EN 10204

DATUM
DATE 9.11.04

ERSCHMELZUNG
MELTING PROCESS
FUSION

☒ E - OFEN
E - FURNACE

☐ LD - VERFAHREN
LD - PROCESS

KUNDE
CUSTOMER
COMMETTANT

G + S METAL S.R.O.
P.O. BOX 35
CZ 27201 KLDNO /TSCHECHIEN

STAHLORTE
STEEL
ACIER 16MnCr5-00

CHARGE
HEAT
COULEE 57807

DURCHMESSER
DIAMETER
DIA 45,00

LIEFERZUSTAND
DELIVERY COND.
ÉTAT DE LIVRAISON

NACH/ACC.TO
EN 10277
+FP+SH+PL, 1GESAEGT

VERSANDANZEIGE
DISPATCH NOTE
AVIS D'EXPEDITION

24/89 /04

STRANG FORMAT
CASTING DIMENSION
DIAMÈTRE BILLETTE

140

BESTELLUNG
ORDER
COMMANDE

NCL/2004/7

AUFTRAGSBESTÄTIGUNG
CONFIRMATION
CONF. DE COMM.
07 G8091/001

PRÜFUNG
TEST
ESSAI

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG % - CHEMICAL ANALYSIS % - COMPOSITION CHIMIQUE %

☒ SCHMELZE/CAST/COULÉE ☐ STÜCK/CHECK ANALYSIS / ANALYSE PAR PIÈCES

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	As
0,16	1,25	0,22	0,017	0,021	0,88	0,10	0,01	0,25	0,016	0,008
Al	Ti	V	Nb	B	N	Σ Al;Ti;V;Nb	Σ Cr;Ni;Mo;Cu	Σ Cr;Ni;Mo	CEV	
0,018	0,022	0,008	0,002			0,050	1,24	0,99	0,57	

PRÜFUNG
TEST
ESSAI

MECHANISCHE KENNWERTE - MECHANICAL PROPERTIES - CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

R _e /R _p 0,2	R _m	A	Z	KV	KCU	HBW	BEHANDLUNGSZUSTAND CONDITION OF TREATMENT ÉTAT DE TRAITEMENT
MPa	MPa	%	%	J	J/cm ²		
						165	+FP+SH+PL, 1G
PRÜFTEMPERATUR TESTING TEMP. TEMP. D'ESSAI °C							

PRÜFUNG
TEST
ESSAI

STIRNABSCHRECKVERSUCH - JOMINYTEST - ESSAI JOMINY

mm	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
HRC	43	42	39	33	30	28	26	25	24	22					

AUSTENITISIERUNGSTEMPERATUR
AUSTENIZING TEMP.
TEMP. D'AUSTÉNITISATION °C

PRÜFUNG
TEST
ESSAI

KORNGRÖSSE - GRAIN SIZE - GROSSEUR DE GRAIN

6

AUSTENIT ☐

FERRIT / PERLIT ☒

nach / by / conforme à
EN ISO 643

PRÜFUNG
TEST
ESSAI

NICHTMETALLISCHE MIKROEINSCHLÜSSE - MICRO INCLUSION RATING - TAUX DE MICROINCLUSIONS

AS 7.1 E 45
DIN 50602

SONSTIGE PRÜFUNGEN - OTHER TESTS - AUTRES ESSAIS

K4<=35

BEMERKUNGEN - NOTE - REMARKS

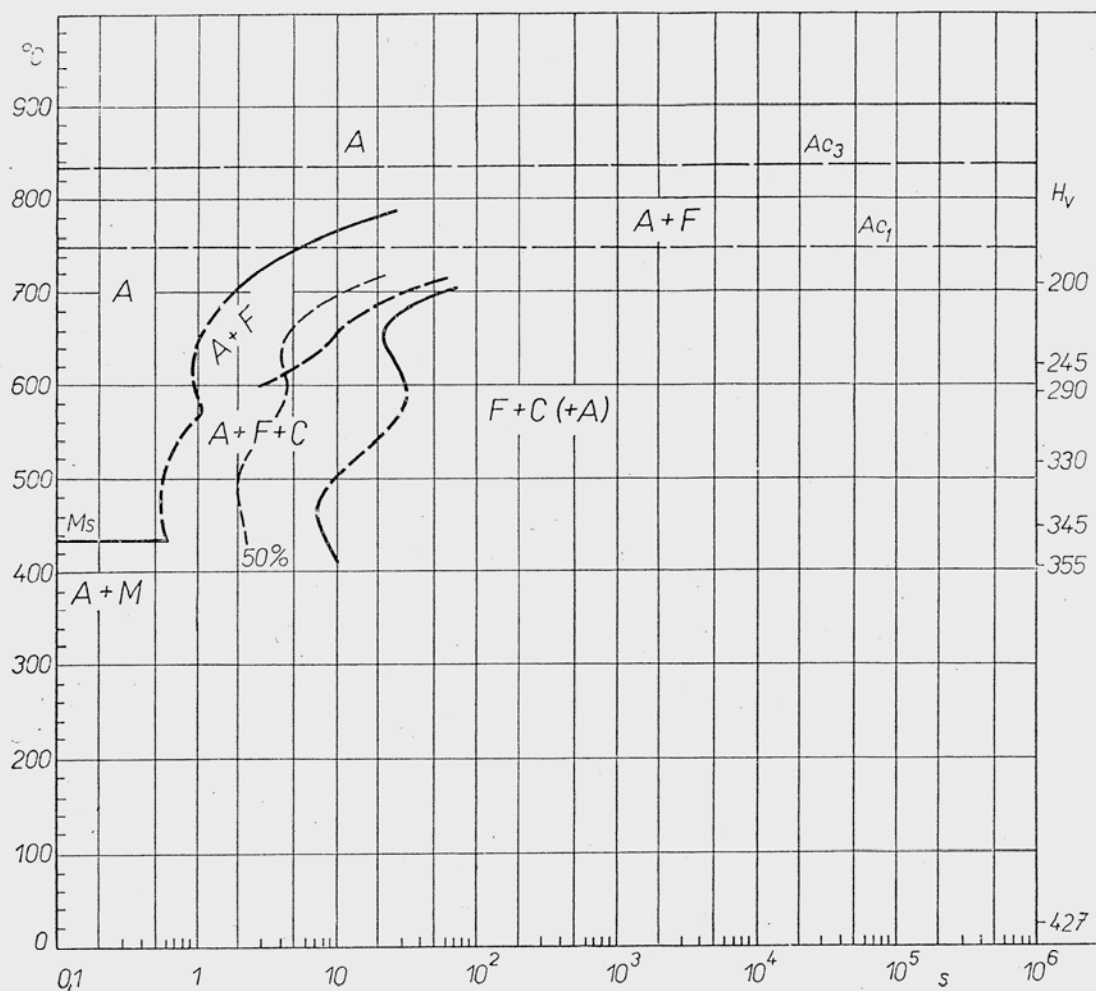
WERKSACHVERSTÄNDIGER

Laudahn

Příloha č. 3

Ocel ČSN14 220

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V
0,16	1,14	0,27	0,030	0,043	1,00	0,12	0,05



austenitizace	teplota	850 °C
	dobu	15 min
velikost zrna		7

Ac ₃	830 ± 5 °C
Ac ₁	747 ± 5 °C
Ms	435 ± 10 °C

WNr.
(číslo materiálu)
1.7131

Mn-Cr ocel k cementování

OCEL
Kurzname (značka)
16MnCr5

Chemické složení [hm. %]

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,14–0,19	max 0,40	1,00–1,30	max 0,035	max 0,035	0,80–1,10

Normy DIN

- [1] DIN EN 10084 – cementační oceli
[2] DIN 17210 – cementační oceli

Mechanické vlastnosti

Rozměr t, d [mm]	–	–	–	11	30	63
Stav	G ¹⁾	BF ²⁾	BG ³⁾	po cementaci (jádro)		
Mez kluzu R _e [MPa] min	–	–	–	635	590	440
Mez pevnosti R _m [MPa]	–	–	–	880–1 180	780–1 080	640–930
Tažnost A ₅ [%] min	–	–	–	9	10	11
Kontrakce Z [%] min	–	–	–	35	40	40
Nárazová práce KV [J] min	–	–	–	34	34	–
Tvrdost HB	max 207	156–207	140–187	–	–	–

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg . m⁻³] 7 850

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ			
normalizační žíhání	BF ²⁾	850–950 °C	ochlazovat na vzduchu ochlazovat v peci přímo kalit do oleje nebo do teplé lázně 160–250 °C nebo ochlazovat v solné lázni 580–680 °C nebo ochlazovat v peci nebo na vzduchu
	BG ³⁾	900–1 000 °C	
žíhání na měkko	G ¹⁾	650–700 °C	
cementace		880–980 °C	
kalení	na jádro	860–900 °C	ochlazovat v oleji nebo v teplé lázni
	na vrstvu	780–820 °C	
	popouštění	150–200 °C	
TVAŘITELNOST			
teploty tváření		1 150–850 °C	
SVAŘITELNOST			
vhodná ke svařování			

Použití

Ozubená kola, talířová kola, kardanovy klouby, hřídele, svorníky, čepy ap.

Ostatní vlastnosti

Desoxidace: uklidněná

Porovnání se zahraničními materiály

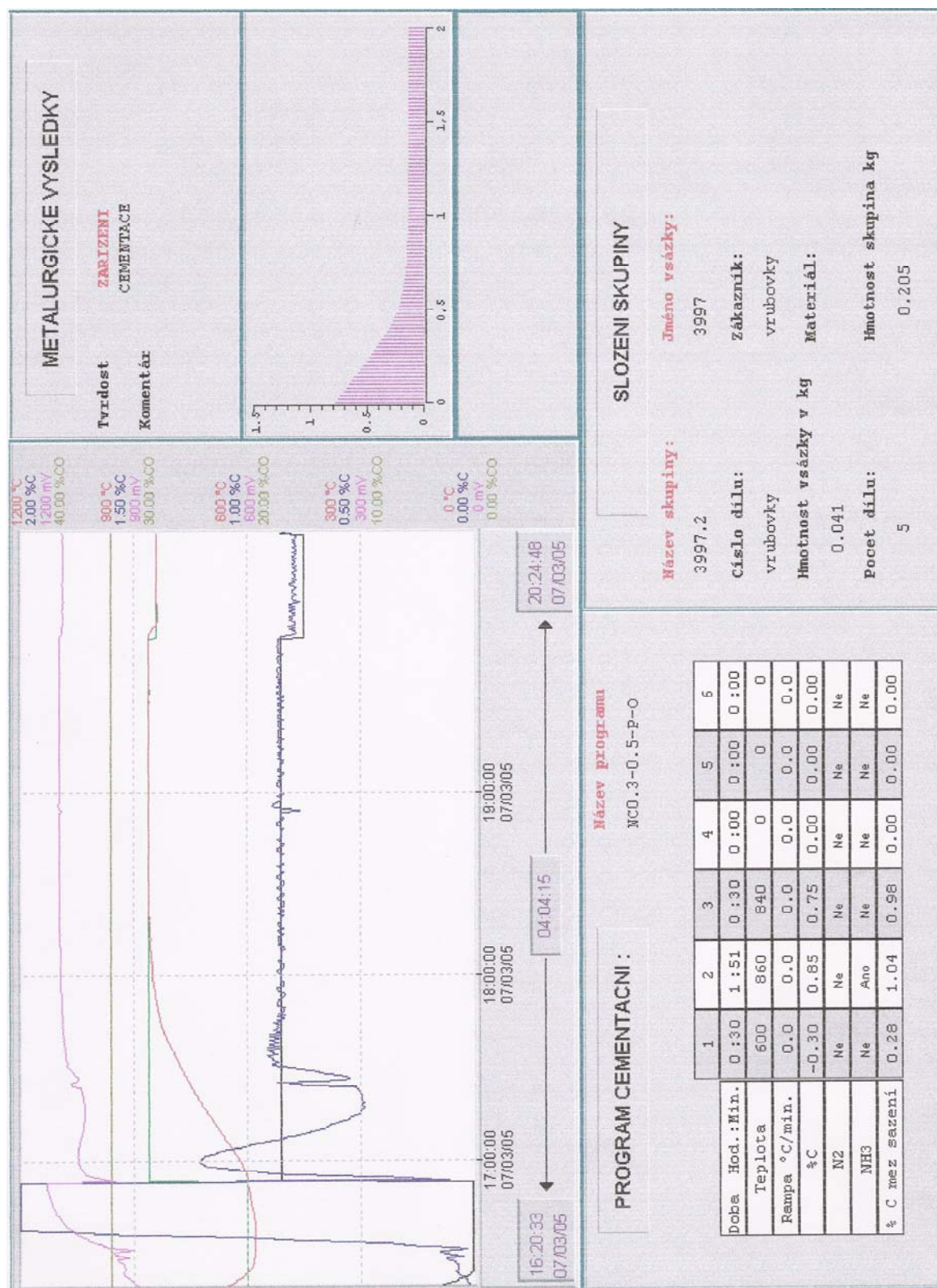
ISO		EURO		Česká republika	
—	—	16MnCr5 16MnCr5KD	EN 84-70 EN 119/3-74	14 220	ČSN 41 4220
Francie		Velká Británie		Rusko	
16MC5 16MC5 16MnCr5RR	NF A35-553-87 NF A35-551-84 NF A36-102-93	527M17 590H17 590M17	BS 970/1-83 BS 970/1-83 BS 970/1-83	18ChG	GOST 4543-71
USA		Japonsko		Kanada	
5115 Gr.5115 Gr.5115 No.5115 No.5115	SAE J1249 ASTM A29 ASTM A519 ASTM A506 ASTM A507	—	—	—	—
Itálie		Rakousko		Švédsko	
16MnCr5 16MnCr5 16MnCr5	UNI 7846-78 UNI 8550-84 UNI 8788-85	—	—	—	—
Polsko		Maďarsko		Norsko	
15HG 16HG	PN H-84030/02-89 PN H-84030/02-89	BC3 BC3Z	MSZ 31-85 MSZ 6251-87	—	—
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
—	—	—	—	16MnCr5 F.1516	UNE 36027-86 UNE 36013-79
Belgie		Bulharsko		Čína	
16MnCr5	NBN 253-03-72	16ChG	BDS 6354-85	15CrMn 20CrMn 20CrMn	GB 3077-88 GB 8162-87 GB 3077-88
Jugoslávie		Rumunsko		Slovensko	
Č.4320	JUS C.B9.020-89	17MnCr10 18MnCr11	STAS 791-88 STAS 791-88	14 220	STN 41 4220

Poznámky

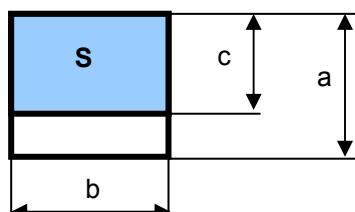
- 1) žhání na měkko
- 2) tepelné zpracování pro dosažení určité pevnosti
- 3) tepelné zpracování pro získání feriticko-perlitické struktury

Příloha č. 4

Průběh nitrocementace



Příloha č. 5



č. vrubového tělíska	teplota popouštění (°C)	a	b	c	S (mm ²)	KCV (J/cm ²)	KCV průměr	HV10	Rozptyl Houževnatosti	Směrodatná odchylka Houževnatosti
1	bez TZ	9,94	10,04	7,947	79,79	chyba				
2	bez TZ	9,96	10,09	7,868	79,39	62,382	61,551	164	0,967	0,984
3	bez TZ	9,93	10,07	7,921	79,76	62,456				
4	bez TZ	9,96	9,98	8,070	80,54	60,029				
5	bez TZ	9,93	10,04	7,962	79,94	61,339				
6	165	9,97	10,06	7,743	77,89	57,661	43,027	733	82,731	9,096
7	165	9,95	9,97	8,034	80,10	29,139				
8	165	9,96	10,03	8,158	81,82	43,985				
9	165	9,97	10,07	8,079	81,36	43,636				
10	165	9,94	9,94	8,069	80,21	40,715				
11	175	9,96	10,08	8,071	81,36	39,176	39,755	723	1,950	1,396
12	175	9,95	10,08	7,985	80,49	37,770				
13	175	9,94	10,01	8,055	80,63	39,285				
14	175	9,97	10,03	7,968	79,92	41,843				
15	175	9,97	10,1	7,992	80,72	40,699				
16	184	10	10,09	8,073	81,46	41,294	39,397	714	6,302	2,510
17	184	9,97	10,07	7,992	80,48	37,287				
18	184	9,97	10,09	8,062	81,35	40,748				
19	184	9,97	10,03	8,077	81,01	35,589				
20	184	10,1	10,02	8,073	80,89	42,068				
21	194	9,95	10,05	7,085	71,20	54,815	42,934	715	38,238	6,184
22	194	9,94	10,01	7,933	79,41	41,741				
23	194	9,96	9,87	8,057	79,52	37,736				
24	194	9,91	9,95	8,027	79,87	41,992				
25	194	9,95	10,08	7,984	80,48	38,384				
26	203	9,94	10,04	7,958	79,90	38,417	41,545	707	26,869	5,183
27	203	10,02	9,97	8,050	80,26	37,023				
28	203	9,95	10,1	8,082	81,63	42,048				
29	203	9,94	10,08	8,029	80,93	51,377				
30	203	10,06	9,95	8,065	80,25	38,862				
31	213	9,99	10,05	7,909	79,49	35,532	36,183	698	17,922	4,233
32	213	9,97	10,05	8,070	81,10	31,317				
33	213	9,98	9,95	8,098	80,58	39,677				
34	213	9,98	10,06	8,074	81,22	42,257				
35	213	9,96	10,08	8,084	81,49	32,133				
36	239	9,96	10,07	8,066	81,22	32,961	36,495	680	12,491	3,534
37	239	9,97	10,06	8,012	80,60	40,029				
38	260	9,97	10,11	8,031	81,19	25,364	27,977	660	6,826	2,613
39	260	9,96	10,07	7,959	80,15	30,590				
40	298	9,94	10,06	8,017	80,65	22,252	19,360	641	41,687	6,457
41	298	9,96	10,1	8,019	80,99	10,413				
42	298	9,95	9,92	8,052	79,88	25,414				
43	307	9,94	10,08	8,017	80,81	26,698	21,856	642	14,217	3,770
44	307	9,94	10,04	8,035	80,67	16,411				

45	307	10,01	10,03	8,067	80,91	18,665				
46	307	9,96	10,11	8,061	81,50	24,307				
47	307	9,99	9,94	8,080	80,32	23,199				
48	318	9,98	10,12	7,990	80,86	18,192	18,355	637	9,263	3,044
49	318	9,98	10,05	8,068	81,08	23,947				
50	318	9,95	10,04	8,077	81,09	16,688				
51	318	9,96	10,08	8,017	80,81	18,082				
52	318	9,98	10,07	8,057	81,13	14,867				
53	326	9,97	9,95	7,957	79,17	20,190	20,783	629	3,023	1,739
54	326	9,96	10,04	8,061	80,93	19,145				
55	326	9,96	10,07	8,071	81,27	20,392				
56	326	9,97	10,07	8,070	81,26	20,032				
57	326	9,96	9,98	7,933	79,17	24,154				
58	335	9,97	10,09	8,058	81,31	15,439	19,201	621	14,151	3,762
59	335	9,96	10,08	8,050	81,14	22,962				
60	350	9,98	10,04	8,423	84,57	8,001	7,100	658	0,258	0,508
61	350	10,03	10,02	8,412	84,29	7,097				
62	350	10,04	10,06	8,434	84,85	7,166				
63	350	10,06	10,05	8,475	85,17	6,563				
64	350	10,11	10,07	8,465	85,24	6,673				
65	nepopuštěné	9,95	10,08	8,053	81,17	31,048		860		
66	360	9,98	10,06	8,416	84,66	8,456	8,564	654	0,398	0,631
67	360	10,09	10,03	8,448	84,73	7,523				
68	360	10,01	10,02	8,431	84,48	8,474				
69	360	10,06	10,02	8,430	84,47	8,940				
70	360	9,99	10,07	8,471	85,30	9,427				
71	370	9,98	10,07	8,389	84,48	10,100	10,015	640	3,198	1,788
72	370	10,02	10,04	8,417	84,51	9,516				
73	370	10,02	10	8,387	83,87	10,290				
74	370	10,04	10,06	8,400	84,50	12,881				
75	370	10,03	10,05	8,436	84,78	7,287				
76	380	10,03	10,02	8,389	84,06	7,233	13,524	645	13,703	3,702
77	380	10,03	9,99	8,449	84,41	14,407				
78	380	10,04	10,03	8,464	84,89	17,559				
79	380	10,12	10,02	8,492	85,09	11,871				
80	380	10,02	10,04	8,381	84,15	16,549				
81	390	10,06	10,07	8,404	84,63	14,485	15,429	638	2,347	1,532
82	390	10,04	10,11	8,484	85,77	17,493				
83	390	10,1	10,04	8,465	84,99	17,077				
84	390	10,07	10,01	8,432	84,40	14,175				
85	390	10,04	10,03	8,362	83,87	13,914				
86	430	10,04	10,05	8,417	84,59	85,788	74,791	619	114,541	10,702
87	430	10	10,03	8,334	83,59	66,637				
88	430	10,05	10,07	8,421	84,80	88,700				
89	430	10,04	10,03	8,400	84,25	61,341				
90	430	10,03	10,07	8,446	85,05	71,488				
91	476	10,18	10,08	8,400	84,67	69,723	83,457	585	266,755	16,333
92	476	10,08	10,16	8,406	85,4	77,622				
93	476	10,1	10,09	8,290	83,65	71,399				
94	476	10,14	10,12	8,420	85,21	84,014				
95	476	10,18	10,14	8,360	84,77	114,528				
96	410	10,04	10,05	8,509	85,52	10,092	13,133	597	14,285	3,780
97	410	10,05	10,03	8,412	84,37	19,178				
98	410	9,98	10,04	8,336	83,69	10,194				
99	410	10,05	10,04	8,417	84,51	16,014				
100	410	10,03	10,06	8,327	83,77	10,185				

Příloha č. 6

VICKERS HARDNESS TEST



NAREX

Metalografie

Chelcického ulice 1932
470 37 Ceska Lipa

Vzorek - typ: **Vrubovka 213**

Datum: 12.5.2005

C. protokolu:

Meril : Ing. vlasak

Indentor : VICKERS

Cas : 10

Objektiv : X 50

Zatizeni : 0.3

císlo výkresu:

císlo programu: NC0,3-0,5PO

císlo vzorku: 1

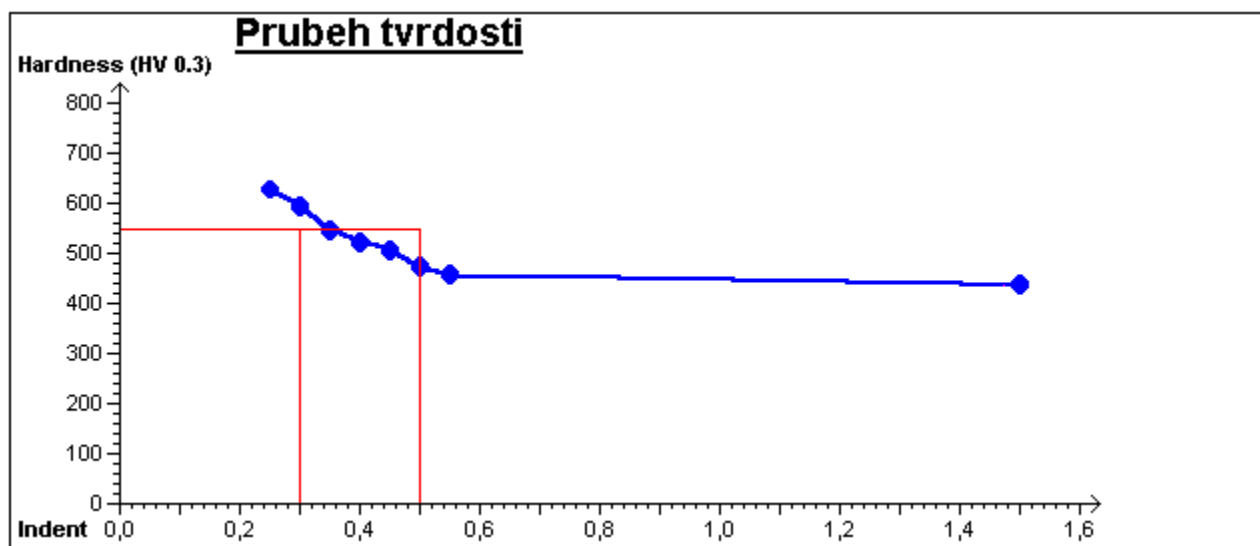
císlo karty vsazky:

Poznámka:

Pozadovana tl. (0,3-0,5) mm

Výsledek zkousky: vyhovuje

Test Program : C:\Hardtest\TestPrg\TutorialKn_Prg02.Tpr



Vysledky

Eht 550 HV 0.3 = 0,35 mm

Jadro = 437 HV 0.3

Rada 1

Bod	Vzdalenost	Tvrdost	Prep. tvrdosti 1
1	0.250	628 HV 0.3	56,8 HRC
2	0.300	595 HV 0.3	55,0 HRC
3	0.350	546 HV 0.3	52,1 HRC
4	0.400	523 HV 0.3	50,7 HRC
5	0.450	506 HV 0.3	49,5 HRC
6	0.500	473 HV 0.3	47,2 HRC
7	0.550	457 HV 0.3	45,9 HRC
8	1.500	437 HV 0.3	44,3 HRC

Příloha č. 7

213					
Kavaleriho metoda		křehký		celá	
		aS	aV	bS	bV
1	10,6	15,5	13,05	15,5	
2	12,9	14,6	13,4	16,1	
3	9,8	14,15	13,4	16,15	
4	10,7	10,8	13,4	16,3	
5	11,55	13,6	13,45	16,3	
6	11,6	14,65	13,4	16,45	
7	12,2	15,8	13,5	16,3	
8	12,85		13,55		
suma a		191,3			
suma b		220,3			
P		86,86			

213			
Metoda kříže		křehký	celá
1	14,2	16,3	
2	17,4	18,9	
3	12,5	13,5	
4	17,8	19,2	
součet	61,9	67,9	
	3831,6	4610,4	
P	83,108		

239					
Kavaleriho metoda		křehký		celá	
		aS	aV	bS	bV
1	14,6	17,7	14,6	17,7	
2	12,8	14,5	14,8	17,8	
3	11,8	15,9	14,8	17,8	
4	11,3	15,8	14,7	17,7	
5	12,1	13,95	14,7	17,75	
6	13,5	14,65	14,7	17,75	
7	14,25	17,6	14,65	17,6	
8	14,4		14,8		
suma a		214,9			
suma b		241,9			
P		88,84			

239			
Metoda kříže		křehký	celá
1	14,4	17,1	
2	19,7	21,2	
3	13,3	14,7	
4	19,1	20,8	
součet	66,5	73,8	
	4422,3	5446,4	
P	81,195		

390					
Kavaleriho metoda		křehký		celá	
		aS	aV	bS	bV
1	14,1	17,9	14,1	17,9	
2	13	14	14,1	17,6	
3	12,9	13,7	14,1	17,6	
4	10,55	15,3	14,15	17,6	
5	12,45	17,4	14,25	17,5	
6	9,55	17,4	14,15	17,6	
7	13,3	17,5	14,1	17,5	
8	14		14,1		
suma a		213,1			
suma b		236,4			
P		90,14			

390			
Metoda kříže		křehký	celá
1	15,95	17,55	
2	17,5	19,9	
3	13,3	14,2	
4	15,6	19,8	
součet	62,35	71,45	
	3887,5	5105,1	
P	76,15		

430					
Kavaleriho metoda		křehký		celá	
		aS	aV	bS	bV
1	14,2	18,2	14,2	18,2	
2	13	14,7	14,2	17,7	
3	11,85	14,1	14,15	17,5	
4	13	13,3	14,2	17,4	
5	11	13	14,2	17,3	
6	13,4	14,9	14,1	17,3	
7	9,3	17	14,1	17	
8	13		14		
suma a		204			
suma b		235,6			
P		86,58			

430			
Metoda kříže		křehký	celá
1	12,8	17,3	
2	14,45	19,85	
3	8,25	14,25	
4	16	20	
součet	51,5	71,4	
	2652,3	5098	
P	52,026		

Příloha č. 8

úhly vrubů	poloměr vrubu
52,3	0,25
42,1	0,14
46,3	0,14
39,8	0,22
42,5	0,27
41,8	0,25
46,7	0,23
48,4	0,16
40,7	0,19
39,5	0,21

Naměřené hodnoty